

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANTONIO CARLOS FRANÇA CAGIDO

**VARIAÇÃO TEMPORAL DA COORDENADA ALTIMÉTRICA A PARTIR DE DADOS
GNSS E DADOS GRACE**

CURITIBA

2017

ANTONIO CARLOS FRANÇA CAGIDO

**VARIAÇÃO TEMPORAL DA COORDENADA ALTIMÉTRICA A PARTIR DE DADOS
GNSS E DADOS GRACE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regiane Dalazoana

CURITIBA

2017

C131v

Cagido, Antonio Carlos França

Variação temporal da coordenada altimétrica a partir de dados GNSS e dados GRACE / Antonio Carlos França Cagido. – Curitiba, 2017.

118 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2017.

Orientador: Regiane Dalazoana .

Bibliografia: p. 92-99.

1. Altimetria. 2. Altitudes – Levantamento. 3. Sistema de Posicionamento Global. 4. GNSS (Navigational system). 5. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Dalazoana, Regiane. III. Título.

CDD: 526.36



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANTONIO CARLOS FRANÇA CAGIDO** intitulada: **VARIAÇÃO TEMPORAL DA COORDENADA ALTIMÉTRICA A PARTIR DE DADOS GNSS E DADOS GRACE**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Julho de 2017.

REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

SÍLVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS

Avaliador Interno (UFPR)

ALESSANDRA SVONKA PALMEIRO

Avaliador Externo (UFRRJ)

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus, aos meus pais, José Carlos Ribas Cagido e Graziela França Cagido (*in memoriam*), por me ensinar a lutar pelos meus objetivos e sonhos. Aos meus irmãos Matheus França Cagido, Marcus Paulo França Cagido e Gabriel Paz França Cagido por todo carinho e ajuda, quando necessitei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ser o grande criador dos homens, pela vida, toda proteção e pela minha fé nele depositada.

À orientadora Dra. Regiane Dalazoana pela orientação e colaboração. E por dispor seus conhecimentos, com grande auxílio, na elaboração deste trabalho, obrigado.

Aos professores: Dra. Regiane Dalazoana, Dr. Silvio Rogério Correia de Freitas e Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira da UFPR, que me passaram através de conteúdos os ensinamentos necessários para um bom conhecimento profissional.

Aos meus examinadores de banca de qualificação, Eng. Dr. Roberto Teixeira Luz e Prof. Dr. Silvio Rogério Correia de Freitas pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), fundação do Ministério da Educação (MEC), pelo auxílio financeiro, possibilitando ao aluno o recurso necessário para desempenhar as atividades da pós-graduação.

Aos meus colegas de pós-graduação, pelas amizades, pelo carinho, e sugestões recebidas. Em especial, Eurico Lourenço Nicácio Junior e Luciana Maria da Silva, pelo companheirismo e colaborações recebidas.

Por meus familiares principalmente ao meu pai pelo auxílio sempre inegável para que pudesse atingir meu objetivo, meus irmãos e minhas avós.

A Carla Fabiana de Andrade por estar ao meu lado na reta final do meu mestrado, agradeço por sua companhia.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. ” Ayrton Senna do Brasil

RESUMO

A partir do lançamento dos primeiros satélites artificiais, deu-se início a uma grande revolução no que podemos denominar de Geodésia Moderna. Isso possibilitou, entre outras coisas, o desenvolvimento de modelos globais do geopotencial (MGGs) que geralmente são calculados em forma de coeficientes de uma expansão em séries de harmônicos esféricos e usados para modelar as funcionais do campo de gravidade da Terra. Com este trabalho tem-se o propósito de analisar a variação temporal da componente vertical de estações, que fazem parte da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), através da utilização de modelos mensais derivados da missão GRACE, com base na funcional altitude geoidal. São realizadas comparações dos dados da RBMC, no que se refere à componente geométrica (altitudes elipsoidais) com altitudes com significado físico (as denominadas altitudes normais-ortométricas) geradas a partir dos MGGs. Os materiais para o cumprimento deste estudo compreendem: as séries temporais de coordenadas geodésicas referentes a 18 estações da RBMC, no período de tempo de Janeiro de 2012 a Julho de 2015, neste caso, coordenadas cartesianas são transformadas em coordenadas elipsoidais; e os modelos mensais do geopotencial baseados nos dados do satélite GRACE, provenientes de três centros de pesquisa, o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), o *GeoForschungsZentrum* (GFZ) e o *Center for Space Research* (CSR), sendo que os modelos foram desenvolvidos em diferentes graus, a saber: 60, 90 e 96. Destes modelos foram obtidos, para cada estação, os valores das altitudes geoidais que posteriormente foram utilizados na obtenção das altitudes normais-ortométricas. A metodologia emprega análises baseadas na determinação da regressão linear (visando obter a taxa de variação das altitudes) e a correlação entre as séries temporais de altitudes elipsoidais e normais-ortométricas. Também foi feita a comparação entre as taxas de variação anual, para o período do trabalho, das altitudes geradas com as funcionais derivadas dos modelos do JPL, GFZ e CSR. Desta forma, o trabalho verificou a potencialidade da utilização de modelos mensais do geopotencial com base na missão GRACE. A verificação partiu de análises dos gráficos onde podem ser observadas as variações das altitudes elipsoidais e das altitudes ortométricas, gerando indicativos de possível soerguimento ou de subsidência da crosta. Na análise das variações anuais das altitudes elipsoidais e ortométricas, os valores obtidos pelo modelo JPL Release-05 desenvolvido até grau 60 e JPL Release-05 desenvolvido até o grau 90 mostraram-se melhores quando comparados com os modelos gerados pelos outros centros de processamento na comparação com os mesmos graus de desenvolvimento, o que compreendeu 38,9% e 33,3% respectivamente, dos valores de variação menores do que um milímetro entre a altitude elipsoidal e a altitude ortométrica. Por fim, foram calculadas as correlações entre as séries temporais de altitudes elipsoidais, normais-ortométricas e altitudes geoidais. Os modelos mensais do geopotencial desenvolvidos até grau 60 tiveram maior correlação com os dados das altitudes elipsoidais quando comparados com os mesmos modelos desenvolvidos para os graus maiores, o que indica uma melhor correspondência entre as variações temporais da altitude elipsoidal e modelos mensais do geopotencial desenvolvidos até grau 60.

Palavras-chave: Modelos mensais do geopotencial, GRACE, altitudes, variação temporal.

ABSTRACT

From the launch of the first artificial satellites, it initiated a great revolution in what we can call Modern Geodesy. This allowed, among other things, the development of global geopotential models that are generally calculated as coefficients of an expansion in series of spherical harmonics and used to model the functionalities of the Earth's gravity field. The objective of this work is to analyze the temporal variation of the vertical component of stations that are part of the Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), using monthly models derived from the GRACE mission, based on the functional Geoid. Comparisons of RBMC data are made with respect to the geometric component (ellipsoidal height) with the component with physical meaning (orthometric height) generated from the MGGs. The materials for the accomplishment of this study comprise: the temporal series of geodesic coordinates referring to 18 RBMC stations, from January 2012 to July 2015, in this case, Cartesian coordinates are transformed into ellipsoidal coordinates: and the monthly geopotential models based on GRACE satellite data from three research centers, Jet Propulsion Laboratory (JPL), GeoForschungsZentrum (GFZ) and Center for Space Research (CSR), different degrees, namely: 60, 90 and 96. From these models were obtained, for each station, the values of the geoid that later were used to obtain the orthometric height. The methodology employs analyzes based on the determination of linear regression (aiming to obtain the rate of change of height) and the correlation between the time series of ellipsoidal and orthometric height. It was also made the comparison between the annual rates of change for the period of work, of the heights generated with the functional ones derived from the JPL, GFZ and CSR models. In this way, the work verified the potential of the use of monthly geopotential models based on the GRACE mission. The analysis was based on analysis of the graphs where the variations of the ellipsoidal height and the orthometric height can be observed, generating indications of possible uplift or subsidence of the crust. In the analysis of the annual variations of ellipsoidal and orthometric height, the values obtained by the JPL Release-05 developed until degree 60 and JPL Release-05 developed up to degree 90 showed the best results obtained when compared with the models generated by the others processing centers in comparison with the same degrees of development, which comprises 38,9 % and 33.3%, respectively, of variation values of less than one millimeter between ellipsoidal height and orthometric height. Finally, correlations between ellipsoidal and orthometric height were calculated. The monthly models of the geopotential developed up to degree 60 had a higher correlation with the data of the ellipsoidal height when compared with the same models developed for the greater degree, which indicates a better correspondence between the temporal variations of the ellipsoidal altitude and monthly models of the geopotential developed until degree 60.

Keywords: Monthly models of geopotential, GRACE, heights, temporal variation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DO TRABALHO	24
FIGURA 2 - ESTAÇÕES USADAS NA REALIZAÇÃO DO ITRF2014.....	31
FIGURA 3 - AS REDES: SIRGAS-C E SIRGAS-N.....	37
FIGURA 4 - REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO	39
FIGURA 5 - FATORES GEOFÍSICOS QUE AFETAM AS OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS.....	47
FIGURA 6 - SATÉLITES GÊMEOS - GRACE.....	54
FIGURA 7 - FLUXO DE DADOS DA MISSÃO GRACE	55
FIGURA 8 - EFEITO DAS MARÉS TERRESTRES NA CROSTA E NO GEOPOTENCIAL	59
FIGURA 9 - ESTAÇÕES RBMC UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO	66
FIGURA 10 - JANELA DO PROGRAMA SPGG.....	71
FIGURA 11 – MAPA DA VARIAÇÃO ANUAL DA ALTITUDE ELIPSOIDAL	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SOLUÇÕES IGS	62
TABELA 2 - ESTAÇÕES FIDUCIAIS PARA INJUNCIÓNAR AS SOLUÇÕES À REDE IGS	63
TABELA 3 - INÍCIO DE MONITORAMENTO DAS ESTAÇÕES.....	67
TABELA 4 - VALORES DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS – ESTAÇÃO UFPR...	75
TABELA 5 - VARIAÇÕES ANUAIS DAS ALTITUDES	82
TABELA 6 - CORRELAÇÕES ENTRE AS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS E ORTOMÉTRICAS	86
TABELA 7 - CORRELAÇÕES ENTRE AS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS E GEOIDAIIS	87

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - ESTAÇÃO BRAZ_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60	77
GRÁFICO 2 - ESTAÇÃO UFPR_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60	77
GRÁFICO 3 - ESTAÇÃO CRAT_ MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60	78
GRÁFICO 4 - ESTAÇÃO BRAZ_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90	79
GRÁFICO 5 - ESTAÇÃO UFPR_ MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90	79
GRÁFICO 6 - ESTAÇÃO CRAT_ MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90	79

LISTA DE SIGLAS

4-D	– Quatro Dimensões
AOD	– <i>Atmosphere-Ocean Dealiasing</i>
BIH	– <i>Bureau International de L’Heure</i>
CCRBMC	– Centro de Controle da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS
CEPGE	– Centro de Processamento de Dados GNSS do Equador
CGVD28	– <i>Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928</i>
CHAMP	– <i>Challenging Mini-Satellite Payload</i>
CNPDG-UMA	– Centro Nacional de Processamento de Dados GNSS da Universidade Nacional
CPAGS-LUZ	– Centro de Processamento e Análises GNSS SIRGAS da Universidade de Zulia
CSR	– <i>Center for Space Research</i>
CTRS	– <i>Conventional Terrestrial Reference System</i>
DGFI	– <i>Deutsches Geodätisches Forschungs Institut</i>
DGFITUM	– <i>DGFI der Technischen Universität München</i>
DORIS	– <i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
DMA	– <i>Defense Mapping Agency</i>
DVL	– Datum Vertical Local
EOP	– <i>Earth Orientation Parameters</i>
EUREF	– <i>European Reference Frame</i>
GAGRS	– <i>Global Absolute Gravity Reference System</i>
GFZ	– <i>GeoForschungsZentrum</i>
GGOS	– <i>Global Geodetic Observing System</i>

GGRF	– <i>Global Geodetic Reference Frame</i>
GGRS	– <i>Global Geodetic Reference System</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GOCE	– <i>Gravity field and Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
GRACE	– <i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRS80	– <i>Geodetic Reference System 1980</i>
GTIII	– Grupo de Trabalho III do SIRGAS
IAG	– <i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICGEM	– <i>International Centre for Global Earth Models</i>
ICRF	– <i>International Celestial Reference Frame</i>
ICRS	– <i>International Celestial Reference System</i>
IERS	– <i>International Earth Rotation and Reference System Service</i>
IHRF	– <i>International Height Reference Frame</i>
IHRS	– <i>International Height Reference System</i>
IGAC	– Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IGM-CI	– Instituto Geográfico Militar
IGN-Ar	– Instituto Geográfico Nacional
IGS	– <i>International GNSS Service</i>
IGSN	– <i>International Gravity Standardization Net</i>
IGSN71	– <i>International Gravity Standardization Net 1971</i>
INEGI	– Instituto Nacional de Estatística e Geografia
IPGH	– Instituto Pan-Americano de Geografia e História
ISDC	– <i>Information System and Data Center</i>
ITRF	– <i>International Terrestrial Reference Frame</i>

ITRS	– <i>International Terrestrial Reference System</i>
IUGG	– <i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
JPL	– <i>Jet Propulsion Laboratory</i> (da NASA)
MGGs	– Modelos Globais do Geopotencial
NAVD88	– <i>North American Vertical Datum of 1988</i>
NGA	– <i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NIMA	– <i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NMM	– Nível Médio do Mar
NNR	– <i>No-Net-Rotation</i>
PO.DAAC	– <i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center</i>
PVCG	– Problema de Valor de Contorno da Geodésia
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS
RDC	– <i>Raw Data Center</i>
RRVS	– Rede de Referência Vertical SIRGAS
RVN	– Referência Vertical Nacional
SDS	– <i>Science Data System</i>
SGB	– Sistema Geodésico Brasileiro
SGM	– Serviço Geográfico Militar
SGR	– Sistema Geodésico de Referência
SIRGAS	– Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPGG	– <i>Single-Point GEM [Global Earth Models] Generator</i>
SLR	– <i>Satellite Laser Ranging</i>
SVR	– Sistema Vertical de Referência
SVRG	– Sistema Vertical de Referência Global
SVRL	– Sistemas Verticais de Referências Locais
SVRN	– Sistema Vertical de Referência Nacional

SVRS	– Sistema Vertical de Referência SIRGAS
TCG	– Tempo Coordenado Geocêntrico
TRF	– <i>Terrestrial Reference Frame</i>
VEMOS	– <i>Velocity Model for SIRGAS</i>
VLBI	– <i>Very Long Baseline Interferometry</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

W_0	– Valor do geopotencial no geoide
h	– Altitude elipsoidal
N	– Altitude geoidal
H	– Altitude ortométrica
W_0^{DVL}	– Valor do geopotencial no geoide do <i>Datum</i> vertical local
X, Y, Z	– Coordenadas cartesianas tridimensionais
$\frac{\partial h}{\partial t}$	– Variações nas altitudes elipsoidais
$\frac{\partial N}{\partial t}$	– Variações nas altitudes geoidais
$\frac{\partial H}{\partial t}$	– Variações nas altitudes ortométricas
λ	– Comprimento de onda
n	– Grau do desenvolvimento em harmônicos esféricos
C, S	– Conjunto de Coeficientes de Stokes
W	– Geopotencial
r	– Distância do ponto ao geocentro
φ, λ	– Coordenadas geodésicas (Latitude e Longitude)
a	– Semieixo maior (raio equatorial)
GM	– Constante gravitacional geocêntrica
m	– Ordem do desenvolvimento em harmônicos esféricos
P_{nm}	– Polinômio de Legendre
ω	– Velocidade angular da Terra
J	– Fator dinâmico de forma
γ	– Gravidade normal
N_{mt}	– Altitude geoidal em mean-tide
N_{zt}	– Altitude geoidal em zero-tide
N_{tf}	– Altitude geoidal em tide-free
k	– Número de Love
θ	– Quantidade auxiliar utilizada no cálculo da latitude
e^2	– Primeira excentricidade ao quadrado
e'^2	– Segunda excentricidade ao quadrado
b	– Semieixo menor
\bar{N}	– Grande normal

h_{mensal}	– Altitude elipsoidal mensal
s	– Número de semanas ocorridas no mês
$h_{semana(i)}$	– Altitude elipsoidal semanal
φ_{mensal}	– Latitude geodésica mensal
$\varphi_{semana(i)}$	– Latitude geodésica semanal
λ_{mensal}	– Longitude geodésica mensal
$\lambda_{semana(i)}$	– Longitude geodésica semanal
$COV(X, Y)$	– Covariância entre X e Y
σ_X	– Desvio padrão de X
σ_Y	– Desvio padrão de Y
ρ	– Coeficiente de correlação linear
μ_X	– Média da variável X
μ_Y	– Média da variável Y
c	– Coeficiente angular
l	– Coeficiente linear
$Var_{anual(altitude)}$	– Variação média anual altimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO (ESTADO DA ARTE)	22
1.2 OBJETIVO GERAL	25
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.4 JUSTIFICATIVA	26
2 FUNDAMENTAÇÃO	28
2.1 SISTEMA DE REFERÊNCIA	28
2.1.1 SIRGAS.....	34
2.1.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS.....	38
2.1.3 Referencial Vertical SIRGAS.....	40
2.2 UNIFICAÇÃO DO REFERENCIAL VERTICAL	42
2.3 VARIAÇÃO TEMPORAL DA REDE VERTICAL.....	44
2.3.1 Componente Geométrica	45
2.3.2 Componente Física	46
2.3.3 Efeitos Geodinâmicos	46
2.4 MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL	48
2.4.1 Modelos do Geopotencial em Harmônicos Esféricos	50
2.5 MISSÃO GRACE	53
2.5.1 Modelos Mensais do Geopotencial	57
2.6 SISTEMAS DE MARÉ.....	58
3 METODOLOGIA	62
3.1 ESCOLHA DO SÍTIO DE TRABALHO	62
3.2 ÁREA DE ESTUDO E PERÍODO TEMPORAL	65
3.3 COMPATIBILIZAÇÃO DOS DADOS GRACE E RBMC	68
3.4 PROCESSAMENTO PELO ICGEM	69

3.5 COMPARAÇÕES DOS DADOS GRACE E RBMC	71
3.5.1 Coeficiente de Correlação Linear	72
3.5.2 Reta de Tendência - Regressão Linear.....	73
4 RESULTADOS.....	74
4.1 CÁLCULO DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS	74
4.2 GRÁFICOS DA VARIAÇÃO TEMPORAL DAS ALTITUDES	76
4.2.1 Análise dos Gráficos – MGG mensais desenvolvidos até o grau 60	76
4.2.2 Análise dos Gráficos – MGG mensais desenvolvidos até grau 90 e 96	78
4.3 TAXA DE VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS E ORTOMÉTRICAS	81
4.4 ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES	85
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE.....	100

1 INTRODUÇÃO

O primórdio da modelagem do campo gravitacional da Terra data mais precisamente no ano de 1687 quando Sir Isaac Newton se propôs a realizar o estudo que antecedeu o surgimento do que hoje conhecemos como modelos do geopotencial. Tais estudos começaram a ser delineados por tantos outros cientistas que vieram na sequência do ilustre físico e que auxiliaram na construção dos atuais modelos do geopotencial, cada vez mais completos e mais ousados quanto a sua proposição.

Nos primeiros anos da década de 1960, foram iniciados estudos tendo por base o rastreamento dos satélites artificiais, com o lançamento do primeiro satélite Sputnik (em 4/10/1957, sendo o primeiro satélite artificial a orbitar a Terra). O avanço destes estudos possibilitou o início de uma revolução para a Geodésia viabilizando a construção dos modelos do geopotencial. Assim, conforme Rapp (1967) que desenvolveu os primeiros modelos do geopotencial em âmbito global e Barthelmes (2013), estes modelos geralmente são disponibilizados como coeficientes de uma expansão em série de harmônicos esféricos, que são usados para modelar as funcionais do campo da gravidade da Terra.

As missões espaciais modernas, tais como as missões *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e *Challenging Mini-Satellite Payload* (CHAMP) são responsáveis pela avaliação do campo de gravidade através das perturbações orbitais dos satélites, sendo o GRACE o único que tem a capacidade de determinar a variação temporal do campo de gravidade. A missão *Gravity field and Ocean Circulation Explorer* (GOCE) utiliza em seu satélite a técnica de gradiometria, isto é, os gradientes de aceleração são calculados diretamente no satélite (SEEBER, 2003). Os satélites são monitorados por equipamentos embarcados, contribuindo significativamente para a obtenção do potencial perturbador.

As grandezas associadas ao campo da gravidade estão sujeitas às alterações causadas por diversos fatores geodinâmicos como listados por Bomford (1971): movimento polar e variação na velocidade angular da Terra, movimento de massas (movimento periódico da Lua e do Sol em relação à Terra, terremotos, ciclos hidrológicos, marés oceânicas, etc...). Considerando esta óptica, pode-se citar os

modelos mensais do campo da gravidade derivados a partir dos dados da missão GRACE que são amplamente utilizados, por exemplo, para determinar as variações de massa d'água afim de saber se estas variações estão de acordo com modelos hidrológicos (TIWARI; SRINIVAS; SINGH, 2014, p. 1-7), (CAZENAVE; CHEN, 2010, p. 265-271) e (SUN et al., 2016, p. 5-8).

Considerando a aplicação dos modelos do geopotencial em determinações das variações temporais do campo da gravidade e suas funcionais, utilizando os modelos baseados na missão GRACE, como foi explicitado nos parágrafos anteriores, esta pesquisa se fundamenta na verificação da potencialidade do uso destes dados com a finalidade de realizar o acompanhamento ao longo do tempo da coordenada vertical em estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) - RBMC. Este acompanhamento temporal é importante no âmbito do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), no que se refere ao tratamento das componentes de altitudes física e geométrica no território brasileiro. O trabalho visa analisar a utilização de séries temporais (mensais) de dados do GNSS, através das altitudes elipsoidais, baseadas em um modelo matemático bem definido, e dados dos Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) baseados na missão GRACE, modelos estes mensais, para detectar possíveis contribuições nas altitudes com significado físico.

Levando em conta a necessidade do acompanhamento temporal da Rede de Referência SIRGAS, e no contexto relacionado à determinação das magnitudes envolvidas nas variações temporais da componente vertical da rede (coordenada altimétrica), o questionamento que surge é acerca da possibilidade de relacionar as variações das altitudes com significado geométrico, como aquelas obtidas por GNSS, com variações nas altitudes com significado físico, como as chamadas altitudes normais-ortométricas, com o uso conjunto de modelos mensais do geopotencial. Neste sentido, o trabalho busca verificar a potencialidade da utilização de modelos mensais do geopotencial com base na missão GRACE no acompanhamento temporal da coordenada vertical.

Em relação à RBMC, implantada no final de 1996, e com o avanço tecnológico relacionado às medições que utilizam as técnicas de posicionamento espacial, foram possibilitadas as aplicações em tempo real. Conforme Alves Costa

(1999), o papel da RBMC tornou-se cada vez mais amplo, sendo de suma importância para a manutenção e a atualização da estrutura geodésica no Brasil. Principalmente, devido à concepção moderna do referencial SIRGAS2000.

Há de se salientar que para a correta execução de trabalhos pertinentes nas áreas de Geodésia, Cartografia e Engenharia é necessário que haja um suporte para a combinação das atividades geodésicas relacionadas com as determinações das coordenadas, atividades práticas e aplicações. O SIRGAS se manifesta como fornecedor desse suporte uma vez que, um dos objetivos, se dá no sentido de promover a Resolução sobre a Rede Geodésica Global de Referência para o desenvolvimento sustentável, expedida pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 26 de fevereiro de 2015 (SIRGAS, 2016a).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO (ESTADO DA ARTE)

A perspectiva de abordagem das Ciências Geodésicas sobre a modelagem da variação temporal da componente vertical tem sido explorada no âmbito global. Pesquisas relacionadas a aplicações dos modelos do geopotencial têm ocorrido no exterior. Isto indica a pertinência do tema abordado nesta pesquisa, e que se destina a ser um modesto complemento da produção científica no país.

Uma das principais atividades que tem ocorrido na América do Norte, conforme Rangelova, Der Wal e Sideris (2012), provém da tentativa de estabelecer um *Datum* vertical baseado no geóide que irá substituir os *Data* oficiais *Canadian Geodetic Vertical Datum 1928* (CGVD28) e *North American Vertical Datum 1988* (NAVD88) no Canadá e nos EUA, respectivamente. Estes autores reforçam que as altitudes dos pontos de referência de nivelamento estão sujeitas a alterações (variações) temporais, que contribuem para a degradação da exatidão do referencial aumentando assim o desajuste das altitudes geoidais determinadas por gravimetria e por GNSS / nivelamento. Esta perspectiva reforça o objetivo aqui proposto, da necessidade de verificação contínua das variáveis estabelecidas.

Em atual pesquisa feita por Hao et al.(2016) é apresentado um estudo do movimento vertical da crosta terrestre em torno do planalto tibetano (que se estende pela província de *Sichuan* e *Yunnan* no sudoeste da China) que foi realizado com dados do *Global Positioning System* (GPS) e do satélite GRACE. Neste estudo,

foram investigadas as variações sazonais observadas sobre os dados das séries temporais GPS e GRACE na região sudeste do platô tibetano e foram analisadas as correlações entre essas duas observações geodésicas. Este estudo revela a importância da utilização dessas missões para avaliar a mudança das taxas de movimento da crosta vertical.

Almeida Filho (2009) em sua tese de doutoramento fez uma investigação acerca das variações do campo gravitacional, obtidas através da missão espacial GRACE e seu relacionamento com a dinâmica das águas na região Amazônica. Ele propôs uma metodologia para que seja possível estimar as cotas onde não existam estações de monitoramento, avaliando a ordem de grandeza dos erros relacionados. São apresentadas ainda, cartas que relacionam hidrogeologicamente as defasagens apresentadas nos ciclos semianuais facilitando assim a aplicação da metodologia por ele proposta.

Der Wal et al. (2010) apresentam estudos referentes as taxas de variação da altitude geoidal derivadas dos satélites GRACE na América do Norte, onde o ajuste da Terra para as antigas camadas de gelo causa um aumento de 1,3 mm/ano no valor das altitudes geoidais. Estas mudanças significativas da altitude geoidal são de particular interesse para estabelecer uma nova referência vertical no Canadá.

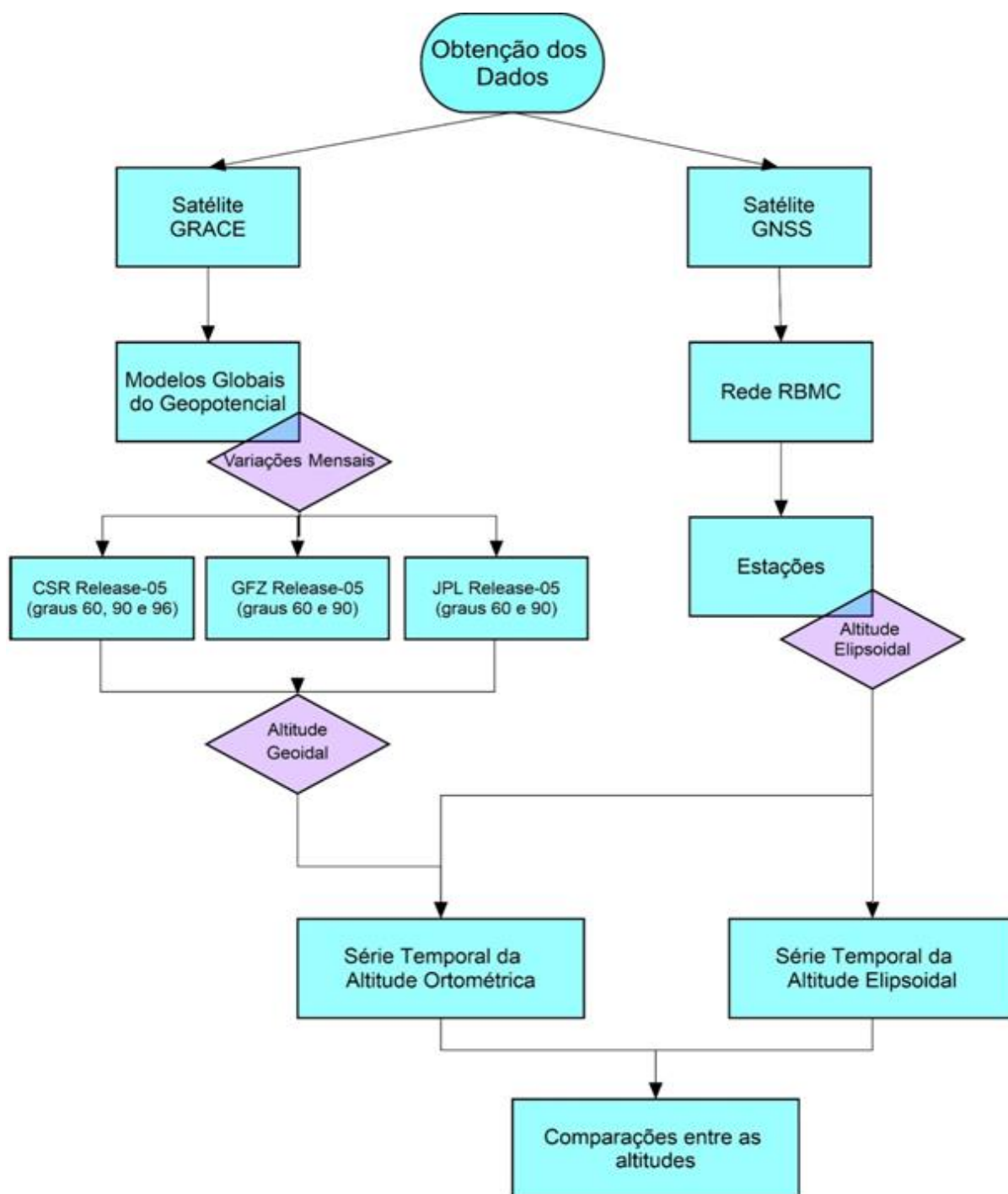
Ainda na perspectiva do uso do satélite GRACE e do GPS, Van Dam; Wahr e Lavallée (2007), fazem uma comparação de deslocamentos anuais verticais da crosta terrestre usando o GPS e GRACE sobre a Europa. Em sua pesquisa, os autores comparam 3 anos de resíduos de altitude elipsoidal pelo GPS em relação ao *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) com deslocamentos verticais afetados pelo campo de gravidade medidos com o satélite GRACE.

Pode-se perceber, na contextualização, que a aplicação dos satélites nas gerações dos modelos do geopotencial, em especial a determinação da variação temporal baseada no satélite GRACE se encaixa nos diferentes nichos da pesquisa. Aqui, espera-se poder iniciar uma fronteira de pesquisa no Brasil que ainda é escassa para esta área.

Seguindo essa óptica de trabalho abordada pelas referências aqui apresentadas, será possível estabelecer indicativos de potencialidade do uso conjunto de dados GNSS e da missão GRACE no monitoramento de coordenadas

verticais no âmbito do projeto SIRGAS que trata das componentes de altitudes física e geométrica.

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DO TRABALHO



Fonte: O autor (2017).

No fluxograma apresentado pela FIGURA 1 precedente, pode-se observar a conexão entre os tópicos principais que serão desenvolvidos neste trabalho que estão intimamente ligados às linhas de pesquisas aprofundadas pela comunidade científica atual. Para realizar a modelagem das variações mensais encontradas entre as altitudes elipsoidais e as altitudes ortométricas na tentativa de monitoramento da Rede Vertical ao longo do tempo, serão utilizados dados das estações RBMC e dados da missão GRACE.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar o monitoramento temporal da coordenada altimétrica em estações da RBMC. Esta análise será feita utilizando as séries temporais de dados GNSS e os modelos globais do geopotencial mensais baseados na missão GRACE.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realizar a modelagem das variações mensais encontradas para as altitudes elipsoidais e para as altitudes normais-ortométricas em estações da RBMC são previstos os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar a viabilidade de utilização dos modelos mensais do geopotencial gerados a partir de dados da missão GRACE, disponibilizados no site do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) e o período de tempo coberto por estes modelos mensais;
- b) Verificar quais as estações da RBMC que possuem disponibilidade de dados compatível com a série temporal de dados da missão GRACE;
- c) Estabelecer a série temporal das altitudes elipsoidais e a taxa de variação a partir dos dados da RBMC;
- d) Estabelecer a série temporal das altitudes normais-ortométricas e a taxa de variação a partir da funcional altitude geoidal derivada dos modelos GRACE;

- e) Comparar as séries temporais das altitudes;

1.4 JUSTIFICATIVA

O Grupo de Trabalho III (GTIII) – *Datum Vertical* do Projeto SIRGAS dedica-se à definição e realização de um sistema de referência vertical unificado nos países membros do SIRGAS. As atividades do GTIII incluem as transformações dos *Data* verticais existentes para o novo sistema. Sistema que considera o relacionamento das altitudes e do seu nível de referência, onde a determinação da variação temporal altimétrica, será uma tarefa de fundamental importância.

O GTIII – *Datum Vertical* do Projeto SIRGAS propõe que o novo sistema de referência vertical se baseie em duas componentes: uma geométrica e outra física. A componente geométrica refere-se às altitudes elipsoidais enquanto que a componente física se refere a quantidades associadas ao geopotencial (valor de W_0 sobre a superfície de referência ou de nível e números geopotenciais para a coordenada vertical primária). Já a realização do referencial deve atender aos seguintes pressupostos (SIRGAS, 2017a):

- a) vincular-se a um nível de referência global unificado (estabelecido por meio do valor de W_0);
- b) basear-se em altitudes físicas (derivadas de nivelamento em combinação com reduções dos efeitos do campo da gravidade), e
- c) vincular-se a uma época de referência, ou seja, deve considerar a variação temporal das altitudes e da superfície de referência.

A necessidade de acompanhamento temporal das altitudes também foi abordada por ocasião do *International Association of Geodesy* (IAG) Symposia realizado durante a 26ª Assembleia Geral da *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) na cidade de Praga em 2015, quando no simpósio sobre Unificação de Sistemas de Altitudes (G06 *Unifying Height Systems*) salientou-se a importância de determinar e modelar a variação temporal das componentes verticais, visando o estabelecimento de um sistema de altitude unificado. Durante a Assembleia foi estabelecida a Resolução 1 da IAG, onde foi definido o *International*

Height Reference System (IHR). Para este fim, serão utilizadas contribuições de todas as comissões e serviços da IAG, como também, as bases de dados disponíveis, normas e infraestrutura dos serviços IAG/GGOS (*Global Geodetic Observing System*).

Devido às variações temporais do campo gravitacional de ordem geodinâmica, deve se levar em consideração, além das coordenadas tridimensionais, a variação ao longo do tempo. A missão GRACE, voltada à determinação do campo da gravidade terrestre propiciou a determinação da variação temporal deste campo (Geodésia 4-D). Ao se fazer a análise temporal desta componente está se garantindo grandezas mais precisas para o campo da gravidade, pois estão envolvidas as variáveis que interferem nas modificações das componentes verticais.

Considerando o panorama global onde estão cada vez mais evidenciados os interesses com questões relevantes para a sociedade (gestão global de riscos, riscos geológicos, recursos naturais, alterações climáticas, previsão de tempestade severa, estimativas do nível do mar, clima espacial, entre outros), é relevante unir os propósitos estabelecidos nessa dissertação aos do projeto GGOS que visa promover a integração e cooperação das comunidades relacionadas com a Geodésia, Geodinâmica e Geofísica, e externamente, para empreendimentos e comunidades relacionadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 SISTEMA DE REFERÊNCIA

Em princípio, as ciências astronômicas e geodésicas buscam interpretar os sistemas de referência como sendo, de quatro dimensões (4-D), realizados por um conjunto de coordenadas geométricas tridimensionais associadas a uma determinada época de referência (TORGE, MULLER 2011, p. 24). Já sob uma concepção bem moderna, segundo a IAG (2016), tem-se que os Sistemas Geodésicos de Referência (SGRs) são os modelos matemáticos e físicos necessários para descrever as posições físicas e a gravidade num ambiente espaço-temporal.

As definições dos parâmetros e convenções são fundamentais para associarmos os modelos geométricos (elipsoide biaxial ou de revolução) aos físicos, fundamentais para a Geodésia, sendo estes modelos devidamente posicionados e orientados em relação a objetos celestes. Na prática, um SGR permite a localização espacial de pontos na superfície terrestre (TIERRA; DALAZOANA; DE FREITAS, 2007, p. 182).

Um Sistema de Referência Terrestre Convencional ou *Conventional Terrestrial Reference System* (CTRS) do inglês, é um SGR que rotaciona junto com a Terra em seu movimento diurno no espaço, definido por um conjunto de parâmetros e convenções associados a um modelo geométrico devidamente posicionado e orientado em relação à superfície da Terra. As coordenadas referenciadas a esse sistema sofrem variações temporais, devido aos efeitos geofísicos (movimentação das placas tectônicas, deformações das marés, entre outros efeitos) (MCCARTHY; PETIT, 2004, p. 32). Para a materialização (realização) no terreno, a denominada Rede de Referência Terrestre - *Terrestrial Reference Frame* (TRF) consiste de um conjunto de estações onde são determinadas as coordenadas para uma determinada época, a fim de obter, por meio de medições de posição relativa, as coordenadas de outras estações para a mesma época (BEVIS; BROWN, 2014, p. 283).

O *International Earth Rotation and Reference System Service* (IERS) foi estabelecido tendo como principais objetivos fornecer para as comunidades

astronômicas, geodésicas e geofísicas (IERS, 2017): o *International Celestial Reference System* (ICRS) e a sua realização o *International Celestial Reference Frame* (ICRF); o *International Terrestrial Reference System* (ITRS) e a sua realização o ITRF; os parâmetros de orientação da Terra - *Earth Orientation Parameters* (EOP) necessários para transformar as coordenadas de um sistema celeste, o ICRS, para o sistema terrestre ITRS; dados geofísicos para interpretar e modelar as variações de tempo/espço dos parâmetros do ICRF, ITRF, ou da orientação terrestre; e padrões, constantes e modelos que incentivam a adesão internacional.

O ITRS é o que a Geodésia tem de mais moderno enquanto sistema, sendo constituído de um conjunto de prescrições e convenções, juntamente com a modelagem necessária para definir a origem, a escala, a orientação e o tempo de evolução de um CTRS. Atualmente, relacionado à forma geométrica da Terra, o elipsoide utilizado é o *Geodetic Reference System 1980* (GRS80). Sua origem é geocêntrica, localizada no centro de massa da Terra e tem a sua orientação fornecida inicialmente pelo *Bureau International de l'Heure* (BIH) na época 1984,0 (MONICO, 2007. p. 98). O ITRS é um sistema de referência terrestre, tal como definido pela resolução IUGG¹ No. 2 adotada em Viena, 1991 e recomendado para aplicações científicas e práticas:

1. A origem do sistema é geocêntrica e o centro de massa é definido para toda a Terra, incluindo oceanos e atmosfera;
2. A escala é compatível com o Tempo Coordenado Geocêntrico (TCG);
3. A orientação inicial foi adotada pelo BIH para a época 1984,0;

¹A *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) é a organização internacional dedicada ao avanço, promoção e comunicação do conhecimento do Sistema Terra, o seu ambiente espacial, e os processos dinâmicos que causam a mudança. A IUGG convoca periodicamente assembleias e workshops internacionais, realiza investigações, reúne observações, coordena as atividades e trabalha para expandir as capacidades e participação em todo o mundo (IUGG, 2016).

4. A evolução temporal da orientação é assegurada pela condição de *No-Net-Rotation* (NNR)²

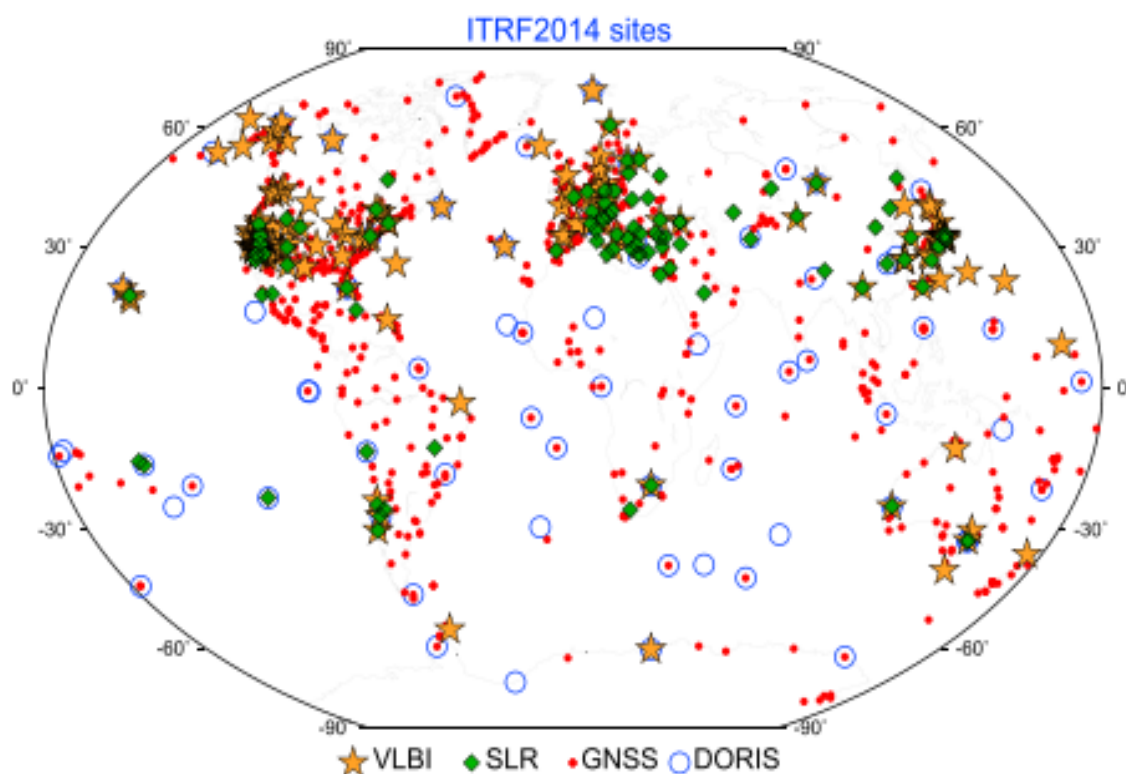
A realização ou materialização do referencial é feita através das redes geodésicas de referência, sendo um conjunto de estações implantadas na superfície terrestre, e cujas coordenadas estão relacionadas ao sistema de referência definido. Segundo Altamimi; Collilieux; Boucher (2008, p.101), um dos principais objetivos do ITRF é fornecer uma rede de referência global com precisão de ordem centimétrica à milimétrica. As coordenadas vêm de um conjunto de soluções baseadas em observações provenientes de diferentes técnicas espaciais. As técnicas geodésicas que contribuem para a criação dos diferentes ITRF são: *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Satellite Laser Ranging* (SLR), GNSS e *Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS). Estas técnicas são organizadas como serviços científicos dentro da IAG (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2011). A precisão das coordenadas do ITRF é dependente da qualidade e da consistência interna das soluções que contribuem para a sua elaboração e definição (ALTAMIMI; COLLILIEUX; BOUCHER, 2008, p. 106).

O ITRF2014 é a versão mais atual da rede de referência. Ele é baseado em soluções de processamento das quatro técnicas existentes: SLR, GNSS, DORIS e VLBI. Os valores foram quantificados, considerando as precisões dos deslocamentos e deformações cossísmicas e pós sísmicas, causados por grandes terremotos. As atualizações temporais das soluções ITRF melhoraram em precisão, e cada nova solução foi demonstrado ser superior às versões anteriores. A rede ITRF2014 possui 1499 estações localizadas em 975 regiões, sendo que cerca de 10% destes locais contam com dois, três ou quatro instrumentos geodésicos espaciais distintos. A combinação de duas ou mais técnicas espaciais para o ITRF

²O *No-Net-Rotation* (NNR) é uma condição de orientação, a fim de estabelecer uma nova rede de referência útil para aplicações em geodinâmica. De modo que é convencionalmente definido em uma época de partida e sua evolução temporal (RIGUZZI, F. et al. 2006, p. 200).

depende da disponibilidade de locais em que dois ou mais instrumentos geodésicos de diferentes técnicas são operados. A FIGURA 2 apresenta a rede ITRF de 2014 destacando as técnicas VLBI, SLR, DORIS e GNSS (ALTAMIMI et al., 2016).

FIGURA 2 - ESTAÇÕES USADAS NA REALIZAÇÃO DO ITRF2014



FONTE: ALTAMIMI et al. (2016).

As observações terrestres são fundamentais para enfrentar os desafios científicos referentes à quantificação de mudanças que estão afetando o sistema Terra, devido às deformações das placas tectônicas, deformações cossísmicas e pós sísmica, derretimento do gelo, entre outros. A Geodésia é uma das Ciências que suporta a determinação de constantes fundamentais do sistema Terra no espaço/tempo para a determinação das características do formato da Terra, além de ser a única ciência que fornece o padrão indispensável contra o qual as alterações e sua variabilidade são quantificadas e devidamente referenciadas (ALTAMIMI et al., 2016, p. 1).

Desta forma contribui de forma significativa para os estudos relacionados aos processos geodinâmicos e de mudança climática global, que figuram entre os problemas que mais afetam a sociedade atualmente. Pode-se afirmar que além de

seus objetivos mais gerais ligados a determinação do tamanho e forma da Terra, campo da gravidade e as variações temporais destes elementos, a Geodésia também propicia a medição e a análise dos fenômenos e efeitos relacionados aos processos físicos da Terra (DREWES, 2006).

Neste sentido a IAG, em 2003, estabeleceu o GGOS com o objetivo de integrar as informações e contribuições provenientes das diferentes técnicas geodésicas de forma a quantificar as alterações sofridas pelo planeta no espaço e no tempo, ou seja, descrever de forma consistente a deformação e os processos de transporte de massas no Sistema Terra (DREWES, 2006).

Na resolução 1, aprovada em 1º de novembro de 2012 pela Décima Nona Conferência Cartográfica Regional das Nações Unidas para a Ásia e o Pacífico, realizada em Bangcoc, de 29 de outubro a 1º de novembro de 2012, foi introduzida a necessidade de melhorar a sustentabilidade e a capacidade do Sistema Mundial de Observação Geodésica e a necessidade de apoiar a adoção do GGOS, manter o referencial geodésico global, fornecendo uma via para sua implementação, e participar de compromissos com o GGOS para assegurar sua sustentabilidade a longo prazo (UNITED NATIONS, 2015).

Em 26 de fevereiro de 2015 a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou a resolução referente ao *Global Geodetic Reference System* (GGRS) visando o desenvolvimento sustentável. O GGRS inclui a geometria, campo da gravidade e orientação da Terra com respeito ao referencial celeste. É um referencial integrado que incorpora o ITRS e o ICRS, um futuro referencial internacional para as altitudes denominado de *International Height Reference System* (IHRS) e uma nova rede global de gravidade absoluta, de acordo com as resoluções No. 1 e No. 2 da IAG.

Desta forma, o GGRS compreende componentes terrestres e celestes. A componente terrestre é uma referência comum para a geometria e para o campo de gravidade da Terra: para um ponto na superfície física da Terra o valor do geopotencial (W_P) é avaliado para a coordenada baseada no ITRS; a unidade de tempo é o segundo e a de comprimento é o metro, ambos do SI; a altitude física é baseada na diferença de potencial da gravidade entre o ponto de interesse e o geoide; o vetor gravidade é o gradiente do geopotencial; geometria e gravidade são

funções implícitas do tempo; necessidade de estabelecer parâmetros fundamentais e convenções, como o sistema de maré por exemplo (IAG, 2016).

O ICRS, por sua vez, é baseado em uma definição cinemática, sendo um sistema quase inercial. O ICRS fornece a base celeste para o GGRS. A relação entre o ITRS e o ICRS é descrita pelos EOP, que não é apenas relevante como parâmetros de transformação entre o ITRS e o ICRS, mas também para relacionar as quantidades geométricas e gravimétricas (IAG, 2016).

O *Global Geodetic Reference Frame* (GGRF) é a realização do GGRS, sendo materializado através dos pontos físicos na superfície terrestre e objetos celestes, como, satélites em órbita terrestre e quasares. O GGRF é um referencial geodésico integrado, incorporando o ITRF e o ICRF, o futuro *International Height Reference Frame* (IHRF) e o novo *Global Absolute Gravity Reference System* (GAGRS), em substituição à *International Gravity Standardization Net 1971* (IGSN71) de acordo com as Resoluções No. 1 e No. 2 da IAG de 2015. A rede de pontos terrestres é global, com densificação nacional e regional. Esta rede de estações GGRF compreende (IAG, 2016):

- a) Observatórios geodésicos fundamentais, que incluem instrumentos precisos e estáveis de manutenção do tempo e que devem ser conectados a estações de referência de tempo, empregando todas as técnicas geodésicas espaciais colocadas com instrumentos gravimétricos, permitindo a conexão entre as coordenadas geométricas, geopotencial e a gravidade.
- b) Outras estações geodésicas, incluindo marégrafos de referência, *Data* verticais locais e estações gravimétricas colocadas, sempre que possível, com instrumentos geodésicos espaciais.

As estações GGRF devem: funcionar de forma contínua, ao longo do tempo, visando assegurar a estabilidade do GGRF; ser equipadas com tecnologia de ponta visando assegurar observações de alta precisão; ser monitoradas continuamente para detectar deformações superficiais da Terra e; ser conectadas aos diferentes referenciais verticais locais visando sua unificação para um referencial vertical global. Para o desenvolvimento do IHRF, será criado um Grupo de Trabalho Conjunto da IAG (IAG, 2016).

Para substituir a IGSN71 pela nova GAGRS, um Grupo de Trabalho definirá um sistema de referência para a gravidade baseado em comparações internacionais de gravímetros absolutos. As estações de referência distribuídas globalmente do IHRF e do GAGRS incluindo as estações para comparações internacionais de gravímetros absolutos, têm de ser ligadas aos observatórios geodésicos fundamentais (IAG, 2016).

2.1.1 SIRGAS

O SIRGAS, denominado Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, originou-se com o objetivo de definir um sistema de referência geocêntrico para o continente Sul Americano. Ele foi concebido na Conferência Internacional para a definição de um Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul, na cidade de Assunção, Paraguai, em 1993, foi organizado pela IAG, pelo Instituto Pan-americano de Geografia e História (IPGH) e pela antiga Agência Cartográfica do Departamento de Defesa dos EUA – *Defense Mapping Agency* (DMA), atualmente *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) (FORTES, 2000, p. 8 - 9).

O projeto SIRGAS teve estabelecidos os seguintes objetivos iniciais (FORTES, 2000):

- Definir um sistema de referência geocêntrico para a América do Sul;
- Estabelecer e manter uma rede de referência;
- Definir e estabelecer um *Datum* geocêntrico.

Com vistas a atender os objetivos acima foram adotadas, durante a conferência, as seguintes definições:

- a) sistema de referência SIRGAS: Materialização do ITRS na América do Sul via estações GPS, propiciando uma rede continental vinculada a um ITRF em dada época;
- b) modelo geométrico geocêntrico: eixos coordenados baseados no ITRS e parâmetros do elipsoide GRS80.

Logo, a definição do SIRGAS é idêntica à definição do ITRS, e sua realização é considerada uma densificação continental do ITRF.

O SIRGAS faz parte da Comissão 1 da IAG (*Reference Frames*), através da Subcomissão 1.3 (*Regional Reference Frames*) e tem como responsabilidade a Rede de Referência Regional para América do Sul e Central (1.3b *Regional Reference Frame for South and Central América*) (SIRGAS, 2016a).

O SIRGAS fornece o suporte necessário para o desenvolvimento das atividades geodésicas relacionadas com a determinação precisa das coordenadas, atividades práticas e aplicações multidisciplinares. Em particular, o SIRGAS se constitui na parte fundamental da infraestrutura de dados espaciais na região e fornece apoio permanente para o Comitê Regional das Nações Unidas sobre a Gestão da Informação Geoespacial para as Américas (UN-GGIM: Américas), cujo objetivo imediato é a promoção da resolução sobre o GGRS para o desenvolvimento sustentável, expedida pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 26 de fevereiro de 2015 (SIRGAS, 2016a).

O SIRGAS está estruturado em três grupos (SIRGAS, 2017b):

- a) SIRGAS-GTI (Sistema de Referência), este grupo se encarrega da manutenção da rede geocêntrica de alta precisão como a densificação do ITRF no continente americano, sendo que até o momento foram realizadas duas campanhas GPS, uma em 1995 (SIRGAS95) e a segunda no ano 2000 (SIRGAS2000). Atualmente, o SIRGAS está materializado por uma rede com cerca de 400 estações GNSS de monitoramento contínuo (SIRGAS-CON), com as coordenadas sendo calculadas semanalmente por Centros de Processamentos e de Combinação do SIRGAS.
- b) SIRGAS-GTII (SIRGAS no âmbito nacional), é responsável pela definição do *Datum* Geodésico SIRGAS nos países que compõem o SIRGAS, sendo dado pela origem, orientação e pela escala do Sistema SIRGAS em combinação com os parâmetros do GRS80.
- c) SIRGAS-GTIII (*Datum* Vertical), é responsável pela definição e realização de um sistema unificado de referência vertical, estabelecido no contexto de um sistema global. O objetivo é determinar os números geopotenciais e as altitudes com significado físico, de todos os países que compõem o SIRGAS, com vínculo a uma superfície equipotencial global, incluindo também o vínculo dos *data* verticais existentes ao novo sistema.

As atividades atuais relacionadas ao GTIII do SIRGAS (*Datum Vertical*) no que tange a componente geométrica, está praticamente definida, com as altitudes elipsoidais referidas ao GRS80. Já para a realização da componente física vertical, é necessária: (i) a atividade de ajustamento continental dos números geopotenciais com respeito a um valor do geopotencial (W_0) único para todos os países americanos; (ii) a determinação unificada de um modelo geoidal para o continente, (iii) a transformação dos sistemas de altitudes existentes em cada país, para o novo sistema de altitude único (SIRGAS, 2016c). Outra atividade, é o estabelecimento de um Sistema Vertical de Referência SIRGAS (SVRS) que trata da unificação do sistema de altitude física e que esteja de acordo com os requisitos GGOS sobre a estabilidade a longo prazo e de alta confiabilidade (JARAMILLO; FREITAS; CAMBOIM, 2015).

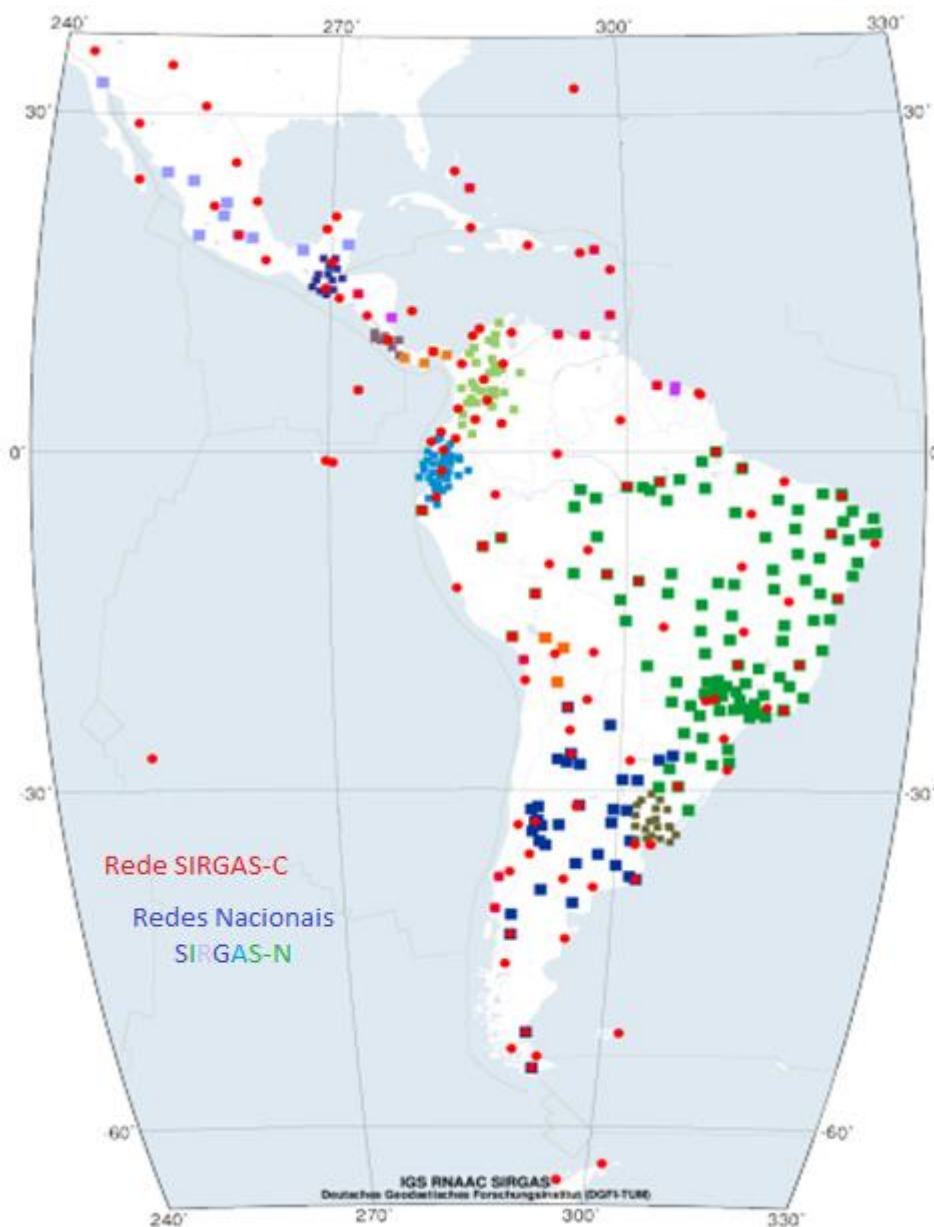
As coordenadas SIRGAS estão associadas a uma época específica de referência e sua variação com o tempo é tomada por velocidades individuais das estações SIRGAS. A consideração da variação temporal das coordenadas devido ao movimento das placas tectônicas pode ser levada em conta com o conhecimento das velocidades das estações (CARVALHO et al., 2015). Para determinar a velocidade das estações SIRGAS, foi recomendada a utilização do modelo contínuo de velocidade que cobre todo o continente “*Velocity Model for SIRGAS*” (VEMOS).

Até o momento, o SIRGAS é composto de 427 estações GNSS; sendo 396 estações GNSS de monitoramento contínuo (SÁNCHEZ, 2016) e 79 delas pertencentes à rede global do *International GNSS Service* (IGS). A rede SIRGAS, ilustrada na FIGURA 3, compreende dois níveis hierárquicos: uma rede de núcleo (SIRGAS-C) composta por um conjunto de estações de referência consistente e confiável; e as redes nacionais de referência (SIRGAS-N) com mais densidade de pontos do que a rede principal. O principal objetivo da rede SIRGAS-C é de assegurar a estabilidade a longo prazo das realizações, enquanto as redes SIRGAS-N visam a acessibilidade à rede de referência nos níveis locais e nacionais (SÁNCHEZ; DREWES, 2016).

A rede SIRGAS-C é processada pelo *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München* (DGFITUM) na Alemanha, uma vez que atua como o centro de análise da rede regional IGS. Em relação às técnicas espaciais, o *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut* (DGFI) e o Instituto

Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) atuam tanto como centros de processamento quanto como centros de combinação.

FIGURA 3 - AS REDES: SIRGAS-C E SIRGAS-N



FONTE: Adaptado de SÁNCHEZ (2016).

As redes SIRGAS-N, por sua vez, são calculadas pelos centros de processamento locais, que fornecem semanalmente soluções para as redes nacionais SIRGAS-N e que são combinadas com a rede principal SIRGAS-C para

obter os valores das posições e velocidades das estações. Os centros de processamento locais atuais são (SÁNCHEZ; DREWES, 2016):

- CEPGE: Centro de Processamento de Dados GNSS do Equador, Instituto Geográfico Militar (Equador);
- CNPDG-UNA: Centro Nacional de Processamento de Dados GNSS da Universidade Nacional (Costa Rica);
- CPAGS-LUZ: Centro de Processamento e Análises GNSS SIRGAS da Universidade de Zulia (Venezuela);
- IBGE (Brasil);
- IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Colômbia);
- IGM-CL: Instituto Geográfico Militar (Chile);
- IGN-Ar: Instituto Geográfico Nacional (Argentina);
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística e Geografía (México),
- SGM: Serviço Geográfico Militar (Uruguai).

2.1.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

A RBMC foi estabelecida em dezembro de 1996. Tornou-se de grande valia para a manutenção e a atualização da estrutura geodésica no Brasil, além de ser a primeira rede GPS de monitoramento contínuo estabelecida na América do Sul. As redes de operação contínua e de técnicas usuais do GNSS, desempenham um papel muito importante nos dias atuais, principalmente quando o SGR for de concepção geocêntrica como é o SIRGAS2000, e que foi adotado oficialmente no Brasil em 2005 (ALVES COSTA et al., 2008).

A RBMC atualmente é constituída por estações materializadas no território nacional, onde os dados são gerados pelas técnicas GNSS e permitem calcular as coordenadas geodésicas de latitude, longitude e altitude elipsoidal, fornecendo aos usuários as localizações das estações com precisão milimétrica. Estas coordenadas podem ser empregadas para projetos de engenharia, monitoramento de barragens, áreas acadêmicas, entre outras finalidades que necessitam de coordenadas

(LOBIANCO, 2011). A FIGURA 4 apresenta as estações que fazem parte da RBMC, sendo 101 estações que podem ser empregadas para pós-processamento ou para posicionamento em tempo real, e 34 estações que podem ser empregadas apenas para pós-processamento.

FIGURA 4 - REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO



Fonte: IBGE (2017a).

Com mesma característica da rede IGS, a RBMC também permite a análise da variação temporal das coordenadas de suas estações. Pelo processamento dos dados em um software científico, possibilita-se um tratamento mais refinado aos dados, proporcionando uma estimativa do vetor velocidade das estações. A RBMC é ainda o elo entre o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e outras redes geodésicas internacionais. Todo o controle da RBMC é feito pela Diretoria de Geociências do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (LOBIANCO, 2011).

Para as estações da RBMC são disponibilizados, entre outros dados, soluções GNSS semanais de dois tipos: as redes livres e redes injuncionadas. Conforme Da Silva (2017), as soluções de rede livre são ajustadas a partir de fracas injunções, possibilitando a estimativa de parâmetros de transformação, cálculo de coordenadas e velocidades, entre a solução GNSS e o sistema de referência ITRF, que é adotado pela RBMC e realizado pelo IGS. Já no caso das soluções de rede injuncionadas, estas são baseadas na ponderação das coordenadas e velocidades a priori das estações de referência.

Atualmente, conforme Lobianco (2011), os receptores GNSS passaram a armazenar os dados em sua memória interna. A transferência dos dados para o Centro de Controle da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (CCRBMC) acontece em grande parte no período da madrugada do dia seguinte ao rastreo. Alguns receptores dispõem da aplicabilidade de enviar automaticamente os dados para o servidor do CCRBMC. Este processo é executado a cada hora em condições normais de funcionamento. Após o recebimento dos dados no servidor do CCRBM, os mesmos são padronizados e armazenados. Aproximadamente às 08h do dia seguinte os dados que foram recuperados e padronizados são disponibilizados no servidor de dados do IBGE, para que qualquer usuário tenha acesso aos mesmos (LOBIANCO, 2011).

2.1.3 Referencial Vertical SIRGAS

Para a determinação de um Sistema Vertical de Referência (SVR), atualmente se busca desenvolver técnicas e metodologias para se dispor de uma superfície de referência para as altitudes locais e verificar a sua relação com altitudes vinculadas a uma superfície de referência global. Um dos propósitos

elementares atuais da Geodésia é o estabelecimento de um Sistema Vertical de Referência Global (SVRG, tradução da sigla em inglês IHRG), motivo pelo qual diferentes países estão trabalhando na vinculação dos Sistemas Verticais de Referências locais (SVRL) com um SVRG. Dois projetos continentais consideráveis têm entre seus objetivos alcançar a vinculação entre SVRL e um SVRG, estes são: *European Reference Frame* (EUREF) no caso da Europa e o SIRGAS na América do Sul (SÁNCHEZ; DE FREITAS, 2016).

O sistema de referência vertical SIRGAS é baseado nas componentes geométrica e física. A componente geométrica adota atualmente o elipsoide GRS80, para relacionar à forma geométrica da Terra e assim determinar a altitude elipsoidal. Esta componente já está bem resolvida. A componente física, segundo Sánchez (2007), implica nos cálculos dos números geopotenciais para um ajustamento continental, na determinação de um modelo quase-geoidal unificado para o continente, além das transformações do sistema de altitude clássica para o sistema de altitude moderno.

A adoção de um sistema de altitude moderno é importante atualmente, pois a componente vertical do SIRGAS não é completamente integrada, devido ao fato de que os sistemas de altitudes clássicas não são compatíveis com as altitudes elipsoidais obtidas pelas técnicas GNSS. Eles referem-se; em geral, ao Nível Médio do Mar (NMM) determinado por marégrafos individuais de cada país, em épocas diferentes entre eles, e se utilizam geralmente de altitudes niveladas que não são corrigidas dos efeitos do campo da gravidade (DREWES et al., 2002).

A definição do sistema de referência vertical dentro do projeto SIRGAS inclui quatro tópicos principais: (1) Os tipos de altitudes; (2) A superfície de referência correspondente na qual as altitudes se referem; (3) A realização da rede de referência; e (4) A manutenção do sistema de referência. Isto é recomendado para introduzir oficialmente dois tipos de altitudes: altitude normal e altitude elipsoidal (DREWES et al., 2002).

Um dos objetivos do GTIII do Projeto SIRGAS, que trata do *Datum* Vertical, e abordado por Dalazoana (2006), é o de analisar as diferenças entre as redes verticais clássicas pertencentes ao SIRGAS e encontrar uma solução fundamentada para um sistema vertical unificado, que atenda a relação entre os dados espaciais.

Foi abordado ainda, que as duas causas principais das diferenças de altitudes entre as redes verticais de cada país são: os erros inerentes às execuções de nivelamento (erros instrumentais, operacionais e principalmente erros causados pela não consideração dos efeitos devidos à gravidade); a segunda causa relaciona-se a definição do nível de referência de cada país com base no NMM e suas variações temporais e espaciais. Deste modo, estimativas da evolução temporal e espacial do NMM podem auxiliar no processo de integração de diferentes redes verticais. As variações do NMM resultam de fenômenos com características multidisciplinares, envolvendo muitas áreas como Oceanografia, Geodésia, Geofísica, etc (DALAZOANA; LUZ; DE FREITAS, 2005).

O SIRGAS-GTIII busca também adotar um método para o estabelecimento de um sistema único com base na integração dos Sistemas Verticais de Referências Nacionais (SVRN) ao SVRG. A solução prevista é estruturada com base na padronização das bases de dados das redes verticais nacionais convencionais e incorporação de dados globais oriundos de plataformas orbitais tais como gravimetria por satélite, altimetria por radar e GNSS (SÁNCHEZ; DE FREITAS, 2016).

Conforme citado anteriormente, o SIRGAS-GTIII pretende buscar uma definição moderna para o SVRS e para o estabelecimento da sua Rede de Referência Vertical SIRGAS (RRVS) com base em números geopotenciais relacionados a um SVRG. Assim, cada Referência Vertical Nacional (RVN) vai ser relacionada com seus pares continentais através do SVRG. Para realizar essa integração, é necessário conhecer as características de cada rede local. Para alinhar a este propósito, o SIRGAS-GTIII está olhando para as normas relativas ao SVRS considerando a integração de seus componentes geométricos e físicos (DE FREITAS, 2015).

2.2 UNIFICAÇÃO DO REFERENCIAL VERTICAL

Ao relacionarmos as características presentes de realização e conexão dos diferentes *Data* verticais, certas carências são discutidas por diversos países em termos de qualidade e deficiência de dados, como: problemas de acumulação dos erros de observação, e as dificuldades de conexão de redes de nivelamento sobre

áreas muito amplas. Além disso, não se pode resolver o problema do transporte da altitude dos pontos de referência nacionais para as ilhas ou de um continente para outro através dos oceanos (ARDALAN; KARIMI; POUTANEN, 2010).

Por exemplo, os dados verticais utilizados na América Latina estão vinculados a concepção clássica de *Datum* vertical, ou seja, se referem aos diferentes marégrafos e por isso há diferentes níveis de referência para países distintos. Com isso, em geral, cada país possui um *Datum* vertical estabelecido de maneira clássica, ou seja, ligando o NMM obtido por longas séries de observação da maré a uma RN situada próxima do marégrafo (DALAZOANA, 2006).

Sob a definição clássica de sistemas de altitude, o nível de referência W_0 para a América do Sul poderia ser a superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra passando por uma Rede de Referência em um marégrafo selecionado. Esta seleção poderia resolver a unificação necessária dos sistemas de altitude existentes na região, mas ainda seria uma solução do sistema local; isto é, suas altitudes associadas (ou número geopotencial) seriam consistentes na América do Sul somente, as incompatibilidades com outros sistemas de altitude ao redor do mundo persistiriam (SÁNCHEZ, 2007).

Essa abordagem não permitiria a combinação precisa do sistema de referência geométrico (altitudes elipsoidais - h) com o físico (altitude geoidal - N e altitudes ortométricas - H) ou quase geoide (altitudes normais) em representações globais. Contudo, o relacionamento entre as componentes altimétricas se dá como mostra a equação (01):

$$H \approx h - N \quad (01)$$

Desde a década de 80, vêm sendo debatidos conceitos para a realização de um IHRS, isto é, a unificação dos sistemas de altitudes existentes bem como a definição de parâmetros fundamentais para sua realização. Esses tópicos vêm sendo discutidos pela IAG, através de comissões e grupos de estudo especiais, além de várias publicações sobre o tema (IHDE; SÁNCHEZ, 2005).

De uma maneira mais global, existe um grande número de redes verticais de referência independentes. Todas elas se referem a diferentes superfícies equipotenciais. Conforme Gerlach e Rummel (2012), um sistema unificado de altitude visa adotar um valor de geopotencial global, com isso torna-se necessário associar dados de diferentes redes nacionais e locais para o global.

A estimativa do valor do geopotencial no *Datum* Vertical Local (W_0^{DVL}) é uma tarefa fundamental para a conexão das diferentes redes verticais existentes e sua unificação se baseia num sistema de referência vertical comum. A determinação do W_0^{DVL} permite as transformações dos sistemas de referência das altitudes locais para qualquer outro sistema de referência vertical, que é especificado por um valor geopotencial conhecido relacionado com o modelo do campo de gravidade convencional (KOTSAKIS; KATSAMBALOS; AMPATZIDIS, 2011).

Com a evolução tecnológica, e conseqüentemente o desenvolvimento das técnicas de posicionamento espacial, os métodos de unificação de altitudes podem ser estabelecidos das seguintes maneiras, conforme Heck e Rummel (1990): (1) por nivelamento geodésico associado com altimetria por satélite; (2) nivelamento oceanográfico; (3) posicionamento por satélite associado com determinações de gravidade, e (4) que envolve o Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG). Estes métodos foram estabelecidos por Heck e Rummel (1990) e abordados por De Freitas et al. (2007), De Freitas et al (2010), Bursa et al. (2006), entre outros autores.

2.3 VARIAÇÃO TEMPORAL DA REDE VERTICAL

Outro aspecto bastante atual no que se refere ao estabelecimento de um referencial vertical unificado está relacionado à necessidade de verificação da variação temporal da rede vertical, com o objetivo de buscar uma melhor acurácia das componentes altimétricas/verticais, além da necessidade de manutenção da rede ao longo do tempo. A variação temporal se dá tanto na componente relacionada ao aspecto físico quanto no aspecto geométrico.

Como mostra Luz (2008), na decorrência da própria definição de gravidade e geopotencial, seus valores estão sujeitos a alterações causadas por variações da velocidade angular da Terra e grandes deslocamentos de massa. Entre estes

últimos se inclui principalmente os devidos ao movimento periódico da Lua e do Sol em relação à Terra e também fenômenos no âmbito terrestre, como terremotos, ciclos hidrológicos, entre outros fatores causados por efeito direto e indireto dos astros perturbadores.

Nesse sentido, de acordo com Rangelova, Der Wal e Sideris (2012), um modelo das variações temporais geoidais irá garantir que a variação temporal das altitudes geoidais possa ser calculada para uma época arbitrária depois da época de referência inicial.

2.3.1 Componente Geométrica

O GNSS vem sendo amplamente utilizado para levantamentos geodésicos, pois oferece uma série de vantagens em relação aos métodos convencionais de levantamento. Sua utilização na determinação de modelos de velocidades, recai sobre a modelagem da variação temporal das coordenadas horizontais (latitude e longitude), ou seja, o GNSS fornece a modelagem dos componentes horizontais do campo de velocidades, porém quando usado para a componente altimétrica sua modelagem tem limitações. Conforme já indicado anteriormente, a velocidade da componente geométrica vertical da superfície terrestre constitui uma importante observação no contexto dos referenciais verticais modernos.

O GNSS tem sido utilizado também em estudos geofísicos e geodinâmicos, como: efeitos devido a terremotos e estudos tectônicos voltados a deformações tectônicas regionais, deslocamentos sísmicos, deslizamentos de terra, movimentos globais das placas tectônicas, soerguimento pós-glacial, entre outros (VAN DAM; WAHR; LAVALLÉE, 2007; TESMER et al., 2011; SATIRAPOD et al., 2013). Outro fator importante relacionado ao GNSS é o de fornecer suporte para a análise das variações hidrológicas, a principal causa das deformações em escalas de tempo sazonais (TIWARI; SRINIVAS; SINGH, 2014).

Em recente trabalho realizado por Bevis e Brown (2014), foram estudados os modelos matemáticos usados por geodestas e geofísicos para caracterizar a posição de estações geodésicas como uma função do tempo e modelos que compreendem a parte cinemática das coordenadas das estações. Para o geodesta, estes modelos são úteis porque eles proporcionam um meio simples e

compacto para prever a posição de uma dada estação, num determinado dia. Esta tarefa constitui a própria essência da realização da rede de referência: restringir as coordenadas de algumas estações em uma dada época, a fim de determinar, através de medições de posição relativa, as coordenadas de outras estações na mesma época. Logo, com precisão e de forma mais consistente (com o tempo) é possível prever a geometria de uma rede de referência.

2.3.2 Componente Física

Os sistemas de altitude estão ligados ao campo de gravidade da Terra através de suas superfícies equipotenciais. Tradicionalmente, a definição da componente física relacionada com a referência vertical, é baseada no conceito de geoide; sendo este, uma superfície equipotencial do campo de gravidade que, sob o ponto de vista clássico, era considerado coincidente com o NMM. O NMM é calculado pela média de registros de nível do mar de modo a definir um "zero" convencional para as altitudes físicas (RANGELOVA et al., 2007).

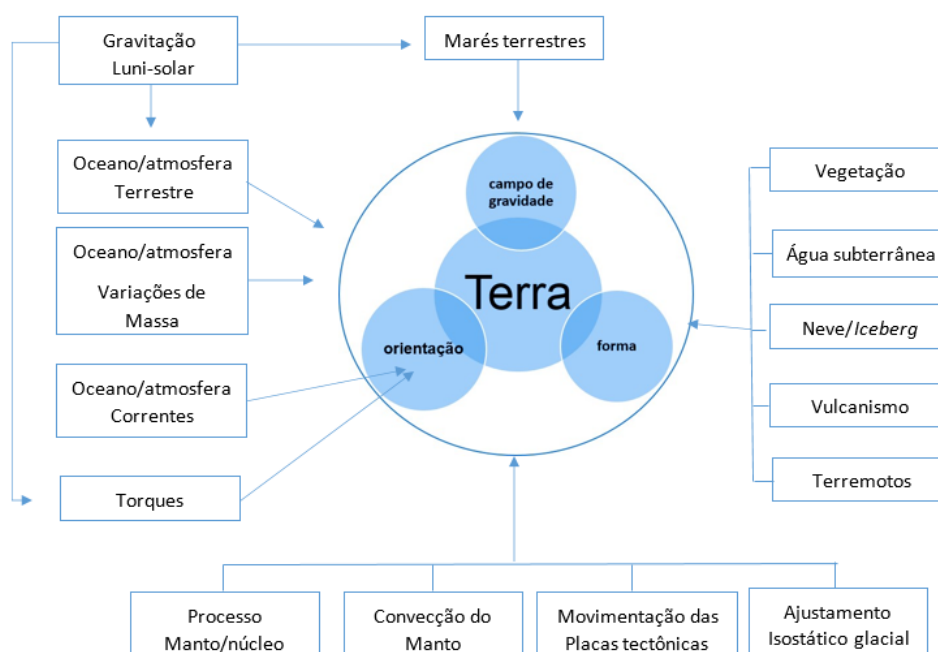
Esta visão tradicional do *Datum* vertical é sujeita a erros sistemáticos e distorções. Eles são um dos principais fatores que contribuem para as variações que ocorrem nas altitudes ortométricas, altitudes elipsoidais e altitudes geoidais (H , h e N , respectivamente) em padrões de referência da rede de controle vertical (FOTOPOULOS, 2003 APUD RANGELOVA et al., 2007). Se mais do que uma referência é introduzida, e, se não é possível determinar a diferença de potencial entre elas, então, o problema do *Datum* vertical envolve a determinação de deslocamentos, logo é fundamental uma introdução aos efeitos geodinâmicos que ocorrem no ambiente terrestre.

2.3.3 Efeitos Geodinâmicos

O planeta Terra está em constante mudança devido aos processos geofísicos existentes e que por diferentes mecanismos, afetam os três pilares fundamentais da Geodésia: rotação da Terra, geometria e cinemática da Terra e o campo gravitacional terrestre. Os efeitos observáveis cobrem uma escala de tempo ampla: questões de segundos a horas (como em terremotos e tsunamis); décadas (como nas variações do nível médio do mar) e processos seculares (como movimentos de

placas tectônicas, variações na cobertura de gelo, resposta pós-glacial), por exemplo. Na FIGURA 5, é visto que os fatores entram de forma diferente para as observações geodésicas e parâmetros (TORGE; MULLER, 2011, p. 350).

FIGURA 5 - FATORES GEOFÍSICOS QUE AFETAM AS OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS



FONTE: Modificado de TORGE; MULLER (2011).

O conhecimento da distribuição e redistribuição de massa da Terra é de crucial importância para a exploração de processos convectivos e climatológicos geodinâmicos dentro do sistema terrestre. As escalas de tempo atendidas por esses processos variam de sub-sazonais e interanuais a decênios e seculares em uma escala espacial global a regional de acordo com a capacidade de resolução de dados dos satélites.

Grande parte destes processos do sistema Terra produz efeitos que podem ser observados tanto na geometria quanto no campo da gravidade da Terra. É importante salientar que estes processos não afetam quantidades geodésicas de forma individual, por exemplo, variações na geometria também produzem variações na gravidade (DREWES, 2006).

Atualmente é possível detectar variações crustais com implicações nas altitudes elipsoidais ($\frac{\partial h}{\partial t}$) através de posicionamento GNSS, conforme comentado

anteriormente, e variações na superfície do geóide com implicações nas altitudes geoidais ($\frac{\partial N}{\partial t}$) podem ser obtidas a partir de dados do satélite GRACE, desta forma segundo Rangelova, Der Wal e Sideris (2012), é possível obter variações na altitude com significado físico (altitudes ortométricas) ($\frac{\partial H}{\partial t}$), de acordo com a equação (02), desde que todas as quantidades estejam vinculadas ao mesmo sistema de maré permanente:

$$\frac{\partial H}{\partial t} \approx \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial N}{\partial t} \quad (02)$$

2.4 MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL

Nos anos que sucederam o lançamento do primeiro satélite artificial, foram criados modelos do potencial da gravidade, que tinham como finalidade representar valores derivados do campo da gravidade. De acordo com Rapp (1967) apud Jamur (2007), os primeiros modelos globais do geopotencial (MGGs) foram desenvolvidos, com base na solução de equações normais, combinando dados de satélites e medições de gravimetria terrestre, tendo como parâmetros os coeficientes do geopotencial. Estes modelos eram desenvolvidos para representar os valores da gravidade ou anomalias da gravidade e só a partir destes valores eram inferidos valores do geopotencial.

Os MGGs são geralmente fornecidos como coeficientes de uma expansão de séries truncada em determinado grau, em termos de funções de harmônicos esféricos, que podem ser usados para calcular o campo de gravidade. O grau máximo (n) de desenvolvimento do modelo pode ser associado ao mais curto comprimento de onda (Λ) na superfície da Terra de acordo com a equação (03) (SEEBER, 2003, p. 469):

$$\Lambda = \frac{2\pi}{n} \quad (03)$$

A resolução espacial máxima dos MGGs, em quilômetros, pode ser obtida dividindo 20000 km pelo grau máximo (n) da expansão em harmônicos esféricos, conforme a equação (04). A determinação da resolução espacial leva em consideração a metade do comprimento de onda:

$$\text{Resolução Espacial} = \frac{20000}{n} \quad (04)$$

Os MGGs são baseados em dados de satélites somente ou combinados com dados de outras fontes, como gravimetria terrestre e altimetria por satélites, por exemplo, e essas combinações produzem modelos do campo de gravidade da Terra. Os altos graus de desenvolvimento dos harmônicos esféricos não alcançados pelos MGGs, são traduzidos pelo chamado erro de omissão ou truncamento relacionado ao geoide/quase geoide. O GOCE, por exemplo, atinge cerca de 30 cm globalmente para o desenvolvimento harmônico para $n=200$ ou resolução espectral de 100 km, o que é sem precedente (GERLACH; RUMMEL, 2012).

Em seu trabalho, Featherstone (2002), separou os MGGs segundo três classes que levam em conta os métodos de obtenção de dados para criação dos modelos:

(1) modelos do geopotencial satélite-somente, utilizam somente informações provenientes do rastreamento de satélites artificiais, sem a utilização de outras fontes de dados gravitacionais;

(2) modelos do geopotencial combinados, isto é, para a determinação dos modelos são usados diferentes dados de gravidade, como a junção de diferentes técnicas: satélites artificiais, gravimetria terrestre, gravimetria aerotransportada, gravimetria marinha, altimetria por satélite;

(3) modelos do geopotencial adaptados, são determinados com base num modelo já criado, com nova implementação dentro de uma determinada região.

É importante citar as formas de rastreio existentes e que são ou foram utilizadas nas missões CHAMP, GRACE e GOCE que foram desenvolvidas para a

determinação do campo de gravidade da Terra. Rummel et al. (2002) e Seeber (2003, p. 471-472) expõem três concepções:

(1) *high-low satellite-to-satellite tracking (HL-SST)*: a posição de um satélite que está em uma órbita baixa é rastreada por satélites em órbita alta, como GPS, GLONASS ou GALILEO, em relação a uma rede de estações terrestres. As forças não-gravitacionais que agem sobre o satélite de órbita baixa são medidas por acelerômetros; esta é a forma de rastreamento utilizada na missão CHAMP.

(2) *low-low satellite-to-satellite tracking (LL-SST)*: compõem-se de dois satélites posicionados na mesma órbita, porém separados por centenas de quilômetros; a distância ou separação entre as naves espaciais é medida por uma conexão entre os satélites com a maior precisão possível (a distância é medida por um interferômetro de micro-ondas). A posição de cada satélite também é determinada por um satélite de órbita alta. O efeito das forças não-gravitacionais que atuam sobre os dois satélites podem ser medidos ou compensados. Este é o caso da missão GRACE.

(3) *satellite gravity gradiometry*: as diferenças de aceleração são medidas diretamente no satélite. Uma vantagem importante, em comparação com a técnica de SST, é que as acelerações não-gravitacionais são as mesmas para todas as medições no interior da nave espacial e, portanto, desaparecem por diferenciação. A missão GOCE se baseia na gradiometria.

Como descrito anteriormente, os dados provenientes das missões espaciais voltadas para a determinação do campo da gravidade da Terra, podem ser usados individualmente para criar os modelos globais do geopotencial. Estes são classificados como MGGs satélite somente, porém nestes modelos, usualmente, os coeficientes de baixo grau vêm do SLR (*Satellite Laser Ranging*).

2.4.1 Modelos do Geopotencial em Harmônicos Esféricos

O campo da gravidade da Terra pode ser expresso através de funções harmônicas esféricas, consistindo de um conjunto de coeficientes de Stokes " C_{nm} " e " S_{nm} ", para descrever a Terra a partir de uma esfera, onde n e m são o grau e ordem de desenvolvimento do modelo, respectivamente. O geopotencial leva em consideração os componentes sólidos e fluidos do sistema Terra, e pode ser

expresso como uma série infinita de harmônicos esféricos. Os harmônicos esféricos são conjuntos de soluções ortogonais (independentes) da equação de Laplace representada em um sistema de coordenadas esféricas (KAULA, 1966), (SEEBER, 2003) e (GEMAEL, 2012).

Conforme Barthelmes (2013), os coeficientes de harmônicos esféricos representam o domínio espectral da estrutura global e as irregularidades do campo de gravidade terrestre. A equação (05) expressa o geopotencial (W) para um dado ponto sobre a superfície da Terra, cuja posição é expressa pela distância do ponto ao geocentro (r), latitude geodésica (φ) e longitude geodésica (λ):

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right] + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \varphi)] \quad (05)$$

Na equação acima, (a) é o semieixo maior do elipsoide de referência ou raio equatorial, (GM) é a constante gravitacional geocêntrica incluindo a atmosfera, (n, m) respectivamente o grau e a ordem dos harmônicos esféricos, (\bar{P}_{nm}) polinômio de Legendre, \bar{C}_{nm} e \bar{S}_{nm} os coeficientes normalizados de Stokes e (ω) a velocidade angular da Terra.

Os coeficientes de Stokes “ C_{nm} ” e “ S_{nm} ” associam-se a distribuição de massas do planeta. Conforme Gemael (2012), o termo de grau zero representa o potencial de uma esfera homogênea, os coeficientes de grau 1 (C_{10} , C_{11} , S_{11}) associam-se às coordenadas do geocentro, já o coeficiente de grau 2 (C_{20}) é associado indiretamente com a forma da Terra (achatamento terrestre). É importante salientar que na equação (05), estão envolvidas as quatro constantes geodésicas fundamentais (a , GM , ω e $J_2 = -C_{20}$ coeficiente zonal denominado fator dinâmico de forma). Os coeficientes de Stokes totalmente normalizados são calculados conforme as equações (06), (07) e (08) (GEMAEL, 2012):

$$\bar{C}_{n0} = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} C_{n0} \quad (06)$$

$$\bar{C}_{nm} = \sqrt{\frac{(n+m)!}{2(2n+1)(n-m)!}} C_{nm} \quad (07)$$

$$\bar{S}_{nm} = \sqrt{\frac{(n+m)!}{2(2n+1)(n-m)!}} S_{nm} \quad (08)$$

Um dos funcionais relacionados com o campo da gravidade, a altitude geoidal (N), pode ser calculada a partir dos coeficientes de harmônicos esféricos para um dado grau n , como mostra a equação (09) onde (γ) é a gravidade normal que varia conforme a latitude do ponto, (R) é a distância aproximada até o geocentro, e (ρ) a densidade (BARTHELMES, 2013).

$$N(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=0}^{max} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) - \frac{2\pi G\rho}{\gamma} R \sum_{n=0}^{max} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (09)$$

Os erros que devem ser considerados na obtenção dos modelos do geopotencial são de duas naturezas: o erro de comissão que é causado pela imprecisão nas determinações dos coeficientes dos harmônicos esféricos; e o erro de omissão, que é devido ao truncamento do grau realizado no cálculo dos coeficientes de uma série.

A função do geopotencial, equação (05), é descrita inicialmente como uma soma de infinitos termos; no entanto, na prática, esta equação tem o somatório limitado num determinado grau e ordem. O ponto em que esta série infinita está truncada depende de muitos fatores relacionados aos parâmetros envolvidos, a precisão dos instrumentos de medição ou as limitações dos recursos computacionais disponíveis. Independentemente de onde a função é truncada,

sempre haverá um nível de erro associado ao fato de que certos parâmetros foram deixados de fora do processo da solução (GUNTER et al., 2006).

A característica do erro de omissão se dá em pequena escala, principalmente em regiões com uma topografia ou uma batimetria acidentada ou ainda em regiões com acentuadas variações laterais de densidade.

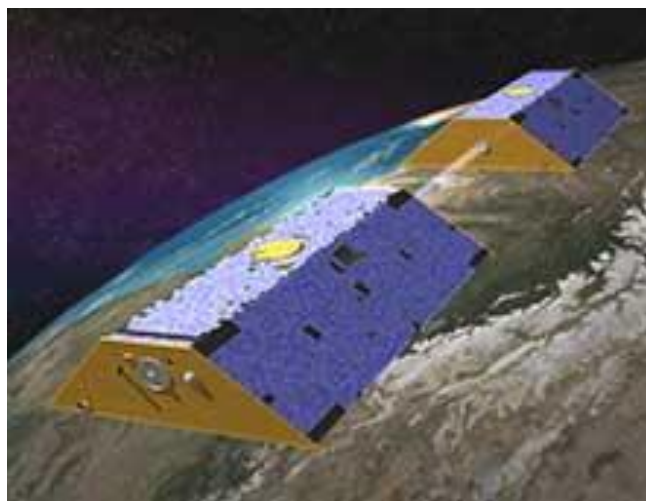
Já, os erros de comissão surgem das limitações dos MGGs, por exemplo, o campo de referência que é usado no procedimento de estimação de mínimos quadrados geralmente representa o melhor conhecimento atual do campo de gravidade da Terra, mas é imperfeito. Em um sentido mais genérico, erros de comissão abrangem uma ampla gama de erros e são o resultado de qualquer sinal não modificado no sistema. Para a missão GRACE, isso inclui erros de sensores como acelerômetros, câmera zenital, sistema de alcance da banda K e outros, bem como erros nos sistemas de maré (GUNTER et al., 2006). Destaca-se também, que uma melhoria na resolução do GRACE e GOCE reduziria os erros de comissão (FLURY; RUMMEL, 2005).

Deve-se enfatizar que os erros de omissão e comissão não são mutuamente exclusivos e são muitas vezes correlacionados. Além disso, ao trabalhar com dados reais, é quase impossível distinguir esses erros do sinal verdadeiro ou de qualquer outra fonte de erro que possa estar presente. Como resultado, o uso de simulações é um passo essencial para a compreensão da natureza dos erros de omissão e comissão (GUNTER et al., 2006).

2.5 MISSÃO GRACE

A missão GRACE, ilustrada na FIGURA 6, que foi lançada em 2002 é uma missão interdisciplinar das ciências da Terra que fornece mensalmente valores do campo de gravidade terrestre, o que permite estudos interdisciplinares da redistribuição de massa na Terra relacionadas com a hidrologia, oceanografia, glaciologia, Terra sólida e mudanças climáticas. Além disso, as investigações capacitadas pelo GRACE incluem a verificação de mudanças de água subterrânea em grande escala, determinação das variações da pressão e do nível do mar, e estimativas de alterações de massa em calotas de gelo polar (EGU, 2016).

FIGURA 6 - SATÉLITES GÊMEOS - GRACE



FONTE: CSR (2017a)

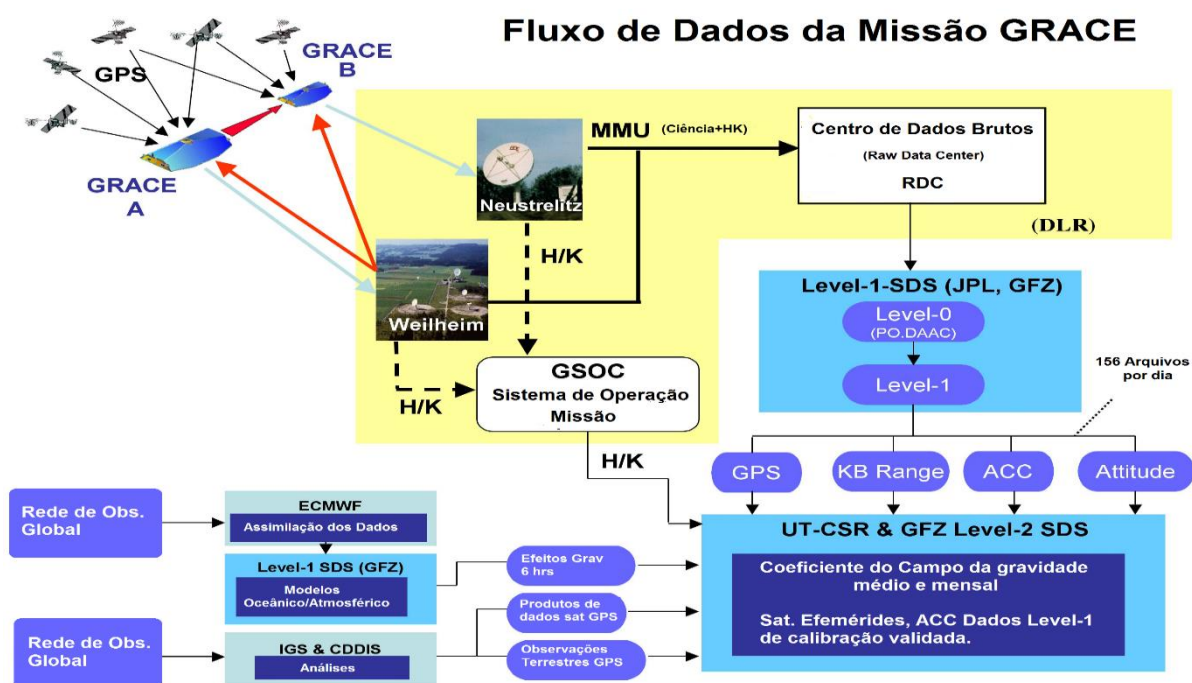
O objetivo primário da missão GRACE foi a obtenção de uma estimativa das variações temporais do campo gravitacional. Este objetivo foi atingido, fazendo contínuas medições entre dois satélites idênticos (gêmeos) utilizando um sistema de rastreamento em micro-ondas (BALMINO, 2002). Cada veículo espacial do sistema GRACE possui tamanho aproximado de 1,942 m de largura, 3,123 m de comprimento, 0,72 m de altura, e massa de 487 kg. Ele é alimentado por quatro painéis de células solares de silício montados na parte superior e lateral do satélite. A bateria é composta por 10 células de níquel-hidrogênio fornecendo até 16 amperes-hora de energia de 28 volts. Os instrumentos que o compõe são: interferômetro de micro-ondas, acelerômetro, câmara zenital e receptor GPS.

O lançamento dos satélites GRACE foi realizado no dia 16 de março de 2002, a vida útil prevista da missão era de cinco anos, a altitude da órbita é de 500 km, com uma inclinação em relação à linha do equador de 89° (quase polar). A distância entre os satélites é de 220 km.

O movimento dos satélites gêmeos GRACE é afetado pela distribuição de massas no planeta. Essa distribuição de massas afeta o campo gravitacional, causando pequenos movimentos relativos entre estes satélites, designados na FIGURA 7 de GRACE-A e GRACE-B. As variações de distância entre os satélites são manifestadas com a mudança no tempo de propagação dos sinais de micro-

ondas entre as duas espaçonaves, que por sua vez é medida pela diferença de fase dos sinais portadores. A influência das forças não-gravitacionais na órbita dos satélites é medida usando um acelerômetro e a orientação da espaçonave no espaço é determinada usando câmeras zenitais. Além disso, receptores GPS a bordo dos satélites fornecem a informação de localização e tempo precisos. O fluxo geral de dados para a missão GRACE é apresentado na FIGURA 7. Em geral, todos os dados científicos são coletados continuamente durante a missão.

FIGURA 7 - FLUXO DE DADOS DA MISSÃO GRACE



FONTE: Adaptado de CRS (2017b)

Conforme Bettapdur (2012), em relação ao *Science Data System* (SDS), sistema de dados científicos do GRACE, ele fornece soluções de gravidade mensais e atua no processamento de dados e arquivamento. Estas tarefas são compartilhadas entre o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), a Universidade do Texas *Center for Space Research* (CSR) e *GeoForschungsZentrum* (GFZ) de *Potsdam*. O SDS é projetado para executar tarefas visando à modelagem do campo da gravidade com a produção dos modelos mensais do campo da gravidade. Além de

que, muitas opções de parâmetros e estratégias de soluções do campo da gravidade são possíveis, e têm sido exploradas pelos GFZ, CSR e JPL.

Bettapudur (2012), apresenta uma divisão dos produtos dos dados da missão GRACE em quatro níveis:

- a) Nível-0, é o resultado da recepção das informações da telemetria dos dados brutos, armazenados e disponibilizados pelo *Raw Data Center* (RDC) da Missão GRACE no *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) em Neustrelitz. Os dados de telemetria de cada passagem são separados no satélite, e colocados em um arquivo no RDC. A partir de cada satélite, dois arquivos de cada passagem são disponibilizados no arquivo. Esses dois arquivos são definidos como os produtos de dados de telemetria do GRACE.
- b) Nível-1A, neste nível, os sensores dos satélites GRACE são calibrados com o objetivo de converter os dados codificados em dados binários. Os produtos de dados não são distribuídos ao público. Esses dados passam por processamento extensivo e irreversível, e são convertidos para produtos de dados editados e limpos em taxas de 1-5 segundos (CSR, 2017b). Os dados são reversíveis para o Nível-0, como também inclui os produtos de dados auxiliares necessários para processamento nos próximos níveis.
- c) Nível-1B, os dados do GRACE são utilizados para produzir o campo de gravidade mensal estimado na forma de coeficientes harmônicos esféricos. Os dados são marcados corretamente no tempo, e a taxa de amostragem de dados é reduzida das taxas mais altas dos níveis anteriores.
- d) Nível-2, os produtos de dados incluem o campo de gravidade, desde a aplicação do processamento, aos produtos de dados de nível anterior. Este também inclui os produtos de dados auxiliares gerados durante este processamento. Ocasionalmente, vários meses de dados são combinados para produzir uma estimativa do campo de gravidade estática. As estimativas mensais são distribuídas através dos sítios *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC) do JPL ou *Information System and Data Center* (ISDC) do GFZ. Os produtos de campo de gravidade estática ou média, também são distribuídos através destes sítios (CSR, 2017b).

2.5.1 Modelos Mensais do Geopotencial

Os modelos mensais do geopotencial são disponibilizados como um conjunto de coeficientes de harmônicos esféricos médios mensal, ou seja, cada modelo disponibiliza os coeficientes de Stokes mensais. Através desses modelos do geopotencial, em escalas globais e regionais, pode-se verificar, por exemplo, as variações de massa causadas por redistribuições de massa devido ao ciclo da água. Em seu trabalho, Schmidt et al. (2006) verificaram que nas maiores bacias hidrográficas do mundo, as redistribuições de massa hidrológicas sazonais são detectadas pela missão GRACE para comprimentos de onda de algumas centenas de quilômetros.

A primeira missão de satélite que propiciou o acompanhamento das variações de massa do sistema Terra mensalmente foi o GRACE. Através das pequenas variações do campo da gravidade da Terra se pode verificar a redistribuição de massa na superfície terrestre. Nas escalas temporais e espaciais dos dados derivados do GRACE, o sinal de gravidade reflete, principalmente, as variações de massa dentro da atmosfera, oceanos e água armazenada em terra. O GRACE não tem resolução vertical pontual, logo, não é possível dizer se uma variação de massa deduzida para alguma região em terra é causada pelas mudanças na água da superfície terrestre, ou na massa atmosférica acima da região (WAHR; SWENSON; VELICOGNA, 2006).

Os primeiros modelos mensais destacaram as grandes variações hidrológicas anuais, com escalas superiores a 1000 km como, por exemplo, na região Amazônica e no sudeste Asiático. Estas variações espaciais e temporais no campo da gravidade da Terra afetam as órbitas dos satélites que permitem as determinações do geopotencial (ALMEIDA FILHO, 2009).

Além do exposto acima, os dados GRACE são úteis para validar os vários modelos de marés oceânicas, analisar os efeitos das marés residuais nos campos médios mensais e estes dados são sensíveis a mudanças devido a efeitos de sinais que ocorrem, principalmente, em grandes áreas e regiões polares. Existem diferentes centros de análise que geram o subconjunto de soluções mensais da gravidade para avaliar seus respectivos modelos de marés oceânica. A maré oceânica ajuda a detectar possíveis erros de interpretação das observações para

monitoramento a longo prazo das alterações climáticas e deformação da Terra sólida (HAN; RAY; LUTHCKE, 2010).

Conforme Chambers e Bonin (2012), os coeficientes do modelo Release-05 foram inicialmente processados como os coeficientes do Release-04, com a exceção de que as estimativas do geocentro são baseadas nos dados gravimétricos da missão GRACE combinados com arquivos de dados referentes a *Atmosphere-Ocean Dealiasing* (AOD) da realização 05. As principais mudanças em relação ao Release-04 incluem um melhor conhecimento dos alinhamentos entre a câmera zenital, o acelerômetro, e o sistema de variação da faixa da banda (K) para dados do Nível-1B, e a atualização do campo gravitacional.

Em relação aos três centros, GFZ, CSR e JPL, segundo Chambers e Bonin (2012), os coeficientes $C_{2,0}$ nas soluções GFZ Release-05 estão consideravelmente mais próximos das estimativas do SLR do que as soluções CSR Release-05 e JPL Release-05, possivelmente devido ao GFZ usar um modelo temporal da gravidade baseado em coeficientes do Release-04, onde o valor $C_{2,0}$ foi substituído pelo valor do SLR. Os autores citados fizeram testes estatísticos com e sem substituição do coeficiente $C_{2,0}$ nos dados GFZ Release-05, e constataram que os resultados não foram significativamente melhores. Como a substituição do coeficiente $C_{2,0}$ ainda é necessária para o CSR Release-05 e o JPL Release-05, os autores optaram por substituir o coeficiente $C_{2,0}$, tanto do CSR quanto do JPL, para fornecer uma maior consistência entre os três centros.

2.6 SISTEMAS DE MARÉ

A maré terrestre é a deformação elástica da crosta devido à ação gravitacional do Sol e da Lua. Esta atração luni-solar perturba o valor da gravidade tanto em módulo quanto em direção, por conseguinte causa variações no geopotencial. A primeira perturbação afeta as medidas da gravidade, a segunda afeta o desvio da vertical, com repercussão no nivelamento geométrico, já a deformação da crosta afeta o posicionamento tridimensional além de causar redistribuição de massas no planeta também com efeito no geopotencial.

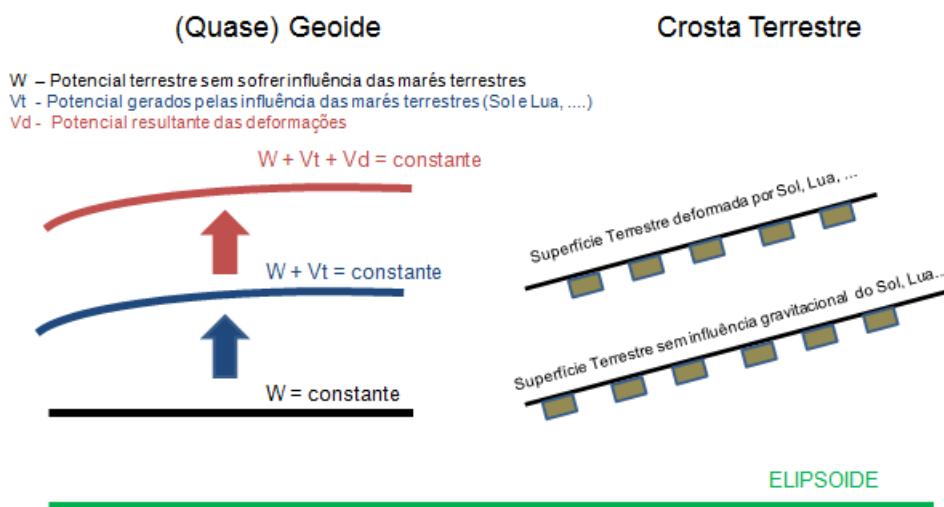
As deformações produzidas pelas marés terrestres afetam o posicionamento relativo com GNSS na medida em que sejam utilizadas linhas de base longas

(~300km). Estas deformações podem chegar a 50 cm segundo a direção vertical e 15 cm segundo a horizontal. Neste sentido, o IERS fornece modelos e correções para tratar esses efeitos. Alguns softwares de processamento GNSS, como Bernese e Geonap, possuem recursos que permitem considerar os efeitos da maré. A gravimetria também é afetada, neste sentido gravímetros modernos já incorporam rotinas para eliminação deste efeito. Já no nivelamento geométrico de precisão os efeitos são usualmente desconsiderados, pois tendem a ser anulados ao longo do circuito.

As deformações das marés podem ser divididas em duas partes: periódica (marés diurnas, marés semidiurnas, marés ter-diurnas) e permanente. A maré permanente, baixa nas áreas polares e mais alta nas áreas equatoriais, é resultado da interação gravitacional da Terra com a Lua e o Sol e produz deformações no corpo planetário e variações no geopotencial (EKMAN, 1989).

As alterações e deformações no potencial da gravidade do corpo planetário são classificadas como: efeito direto (causado pelos próprios astros perturbadores) e efeito indireto (proveniente das deformações do corpo planetário – alteração do geopotencial pelas massas deslocadas). O efeito das marés terrestres na crosta e no potencial está ilustrado na FIGURA (8).

FIGURA 8 - EFEITO DAS MARÉS TERRESTRES NA CROSTA E NO GEOPOTENCIAL



FONTE: Adaptado de Sánchez (2015)

Conforme Mäkinen e Ihde (2009) o tratamento dos efeitos de maré permanente no geopotencial e na forma da Terra envolvem três diferentes Sistemas de Maré Permanente:

a) *non-tidal* ou *tide free* (sem maré ou livre de maré): as deformações permanentes são eliminadas totalmente dos levantamentos, posição e potencial. Para as quantidades relacionadas ao potencial, como gravidade e geóide, tanto o potencial gerador de maré quanto o potencial de deformação da Terra, ou efeito indireto, são eliminados. É como se o Sol e a Lua não existissem ou fossem transladados artificialmente ao infinito. Exemplo: ITRF/SIRGAS.

b) *zero-tide* (maré zero) ($W + V_d$): somente os efeitos da maré permanente de forma indireta no potencial são estimados. Exemplo: gravimetria e modelos globais do geopotencial.

c) *mean-tide* (maré média) ($W + V_t + V_d$): considera nas posições o efeito médio da maré e os respectivos efeitos diretos e indiretos no potencial, não é calculada nenhuma correção. Exemplo: sistema gravimétrico IGSN-71 e redes de nivelamento.

A IAG através de sua Resolução nº16, de 1983, recomenda o uso do sistema *zero-tide* para observações geodésicas como a gravidade e funções associadas como altitudes físicas; e *zero-tide* ou *mean tide* para posições tridimensionais como o ITRF, neste caso a IAG indica que os efeitos indiretos não devem ser removidos.

A consideração acerca do sistema de maré é importante, pois para as altitudes a diferença entre um ou outro sistema de maré pode chegar a 10cm. Isto implica em possíveis problemas na geração de geóides que envolvem posicionamento GPS sobre RN, por exemplo. Ou no caso deste trabalho, quando são comparadas informações provenientes de posicionamento GNSS e informações provenientes de MGGs.

O sistema de maré empregado na realização do trabalho foi o *tide free*, devido ao fato de que os dados da RBMC estão neste sistema de maré. No processamento e obtenção das funcionais a partir dos MGGs, há a opção de determinar entre os sistemas de maré permanente existentes. As equações (10), (11) e (12), apresentadas por Ekman (1967), são utilizadas para a transformação da altitude geoidal entre os diferentes sistemas de maré. As variáveis (N_{mt}), (N_{zt}) e

(N_{tf}) , representam as altitudes geoidais em *mean-tide*, *zero-tide* e *tide free*, respectivamente. Sendo (φ) a latitude do ponto e (k) representa o número de Love.

$$N_{mt} = N_{zt} + (9,9 - 29,6 \times \text{sen}^2 \varphi) \text{cm} \quad (10)$$

$$N_{tf} = N_{zt} - k(9,9 - 29,6 \times \text{sen}^2 \varphi) \text{cm} \quad (11)$$

$$N_{tf} = N_{mt} - (1 + k)(9,9 - 29,6 \times \text{sen}^2 \varphi) \text{cm} \quad (12)$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os materiais e os métodos que serão usados na análise da variação das séries temporais referentes às altitudes elipsoidais de um conjunto de estações da RBMC, através do monitoramento contínuo das estações por GPS; como também, para as séries de altitudes normais-ortométricas destas mesmas estações, calculadas a partir da obtenção das altitudes geoidais derivadas de modelos globais mensais do geopotencial da missão GRACE.

3.1 ESCOLHA DO SÍTIO DE TRABALHO

Relacionado ao SIRGAS, no qual as estações da RBMC estão inseridas, tanto a rede continental (SIRGAS-C) como as nacionais (SIRGAS-N) têm as mesmas características de qualidade e cada estação é processada por diferentes centros de processamento. Estes centros geram soluções semanais semilivres das redes SIRGAS-N, as quais são combinadas posteriormente com a rede continental SIRGAS-C, determinando assim, as posições e velocidades de todas as estações. Esta tarefa é realizada pelo IBGE e pelo DGFI, e os resultados são disponibilizados para a comunidade através do servidor <ftp.sirgas.org>. As soluções "fixas" semanais são referidas à época de observação e ao ITRF vigente (IBGE, 2017b).

O referencial ITRF adotado pela RBMC é o realizado pelo IGS na época para a qual as órbitas IGS foram calculadas. Deve-se mencionar que o IGS utiliza somente dados de estações GNSS no cálculo de suas órbitas, assim são disponibilizadas somente soluções em ITRF (IGb00), ITRF(IGS05), ITRF(IGS08), ITRF(IGb08) e ITRF(IGS14), dependendo de quando os dados foram coletados, conforme TABELA 1 (IBGE, 2017):

TABELA 1 - SOLUÇÕES IGS

Data do Rastreio GNSS	Realização IGS	Correção do Centro de Fase
25/01/2005 a 04/11/2006	IGb00	Relativo
05/11/2006 a 16/04/2011	IGS05	Absoluto
17/04/2011 a 06/10/2012	IGS08	Absoluto
07/10/2012 a 28/01/2017	IGb08	Absoluto
29/01/2017 a atualmente	IGS14	Absoluto

FONTE: IBGE (2017).

O centro de combinação tem como objetivo combinar as soluções individuais semanais geradas pelos centros locais de processamento SIRGAS, oriundas do processamento das Redes Nacionais, com a solução semanal da rede continental SIRGAS-CON-C calculada pelo IGS-RNAAC-SIR (DGFI). Nesta combinação são geradas soluções livres e soluções injuncionadas ao referencial ITRF (IBGE, 2017c). Para a realização desta pesquisa foram utilizadas as estações com coordenadas semanais injuncionadas ao IGS e que são combinadas às soluções de todas as estações SIRGAS-CON ativas presentes no processamento daquela semana (IBGE, 2017d).

As etapas realizadas pelo centro de combinação SIRGAS – IBGE para a determinação das soluções combinadas são (IBGE, 2017d):

- 1) Análise das soluções individuais;
- 2) Eliminação de injunções de soluções individuais;
- 3) As soluções individuais são injuncionadas à rede IGS a partir das estações fiduciais. As estações fiduciais estão indicadas na TABELA 2:

TABELA 2 - ESTAÇÕES FIDUCIAIS PARA INJUNCIONAR AS SOLUÇÕES À REDE IGS

Estações Fiduciais		
BOGT 41901M001 - Bogotá - COL	GLPS 42005M002 - Puerto Ayora - EQU	OHI2 66008M005 - O'Higgins - ANT
BRAZ 41606M001 - Brasília - BRA	GOLD 40405S031 - Goldstone- EUA	PALM 66005M002 - Palmer - ANT
BRFT 41602M002 Eusébio - BRA	GUAT 40901S001 - Guatemala - GUA	PARC 41716S001 - Punta Arenas
BRMU 42501S004 - Bermuda -UK	ISPA 41703M007 - Easter Island - CHI	SCUB 40701M001 - Santiago de Cuba - CUB
CONZ 41719M002 - Concepcion - CHI	LPGS 41510M001 - La Plata - ARG	UNSA 41514M001 - Salta - ARG
CRO1 43201M001 - Saint Croix -EUA	MDO1 40442M012 - Fort Davis - EUA	VESL 66009M001 - Sanae Velesk - ANT

FONTE: IBGE (2017d)

- 4) Combinação das soluções individuais referidas ao IGS;
- 5) Comparação das soluções individuais combinadas na etapa 4. Estações com resíduos maiores que 10mm em N-E e/ou maior que 20mm em U são eliminadas da solução individual. As etapas 3, 4 e 5 são iterativas;
- 6) Determinação do fator de escala;

7) Cálculo da solução semanal semilivre (posição a priori de todas as estações são injuncionadas com sigma de 1 metro);

8) Cálculo da solução combinada referida à rede IGS. Esta solução contém as coordenadas utilizadas para aplicações práticas.

O IBGE disponibiliza, em seu sítio na internet, os dados das coordenadas semanais das estações referenciadas ao IGS. Dentro do sítio <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/combinacao/> se encontra o diretório das estações da RBMC. São disponibilizadas as coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z) que informam a localização da estação com base em um sistema de referência cartesiano geocêntrico, com periodicidade semanal para os usuários.

Os dados podem ser obtidos através de pastas que estão identificadas num diretório do tipo (.crd) que disponibilizam para o usuário parâmetros como: semana GPS; a época em que os dados foram coletados; a data de disponibilização dos dados no diretório; o nome da estação; além das coordenadas cartesianas tridimensionais.

Após a aquisição das coordenadas cartesianas semanais, utilizando a formulação referente ao método direto de conversão de coordenadas, se fez a transformação das coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para as coordenadas geodésicas (φ , λ , h). Nas equações (13) e (14) são expressas as fórmulas para as determinações de quantidades auxiliares, (p) e (θ), utilizadas no cálculo da latitude. As equações (15) e (16) indicam a obtenção da primeira excentricidade ao quadrado (e^2) e da segunda excentricidade ao quadrado (e'^2), onde (a) é o semieixo maior do elipsoide GRS80 e (b) o semieixo menor do elipsoide GRS80. A realização dos cálculos de transformação das coordenadas cartesianas tridimensionais em coordenadas geodésicas, foi feita no programa Excel.

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(Z * a)}{(p * b)} \quad (14)$$

$$e^2 = \frac{(a^2 - b^2)}{a^2} \quad (15)$$

$$e'^2 = \frac{(a^2 - b^2)}{b^2} \quad (16)$$

Nas equações (17), (18) e (20) são apresentadas as formas de obtenção das latitudes e longitudes geodésicas e altitudes elipsoidais semanais que foram utilizadas neste trabalho. A equação (19), representa a determinação da grande normal, ou raio de curvatura da seção do primeiro vertical (\bar{N}).

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z + e'^2 * b * \sin^3(\theta)}{p - e^2 * a * \cos^3(\theta)} \right) \quad (17)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (18)$$

$$\bar{N} = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 * \sin^2(\varphi))}} \quad (19)$$

$$h = \frac{p}{\cos(\varphi)} - \bar{N} \quad (20)$$

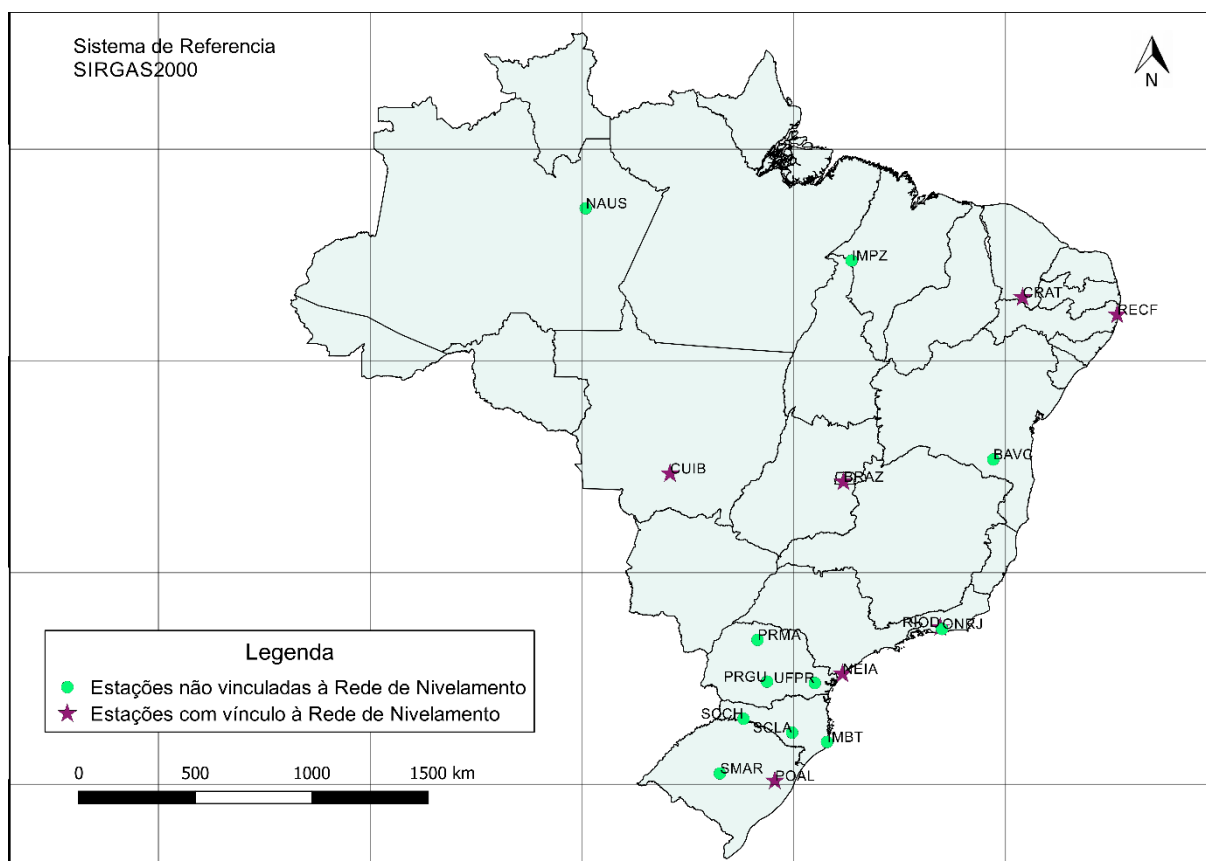
3.2 ÁREA DE ESTUDO E PERÍODO TEMPORAL

Atualmente, a RBMC conta com 135 estações de monitoramento distribuídas pelo Brasil, que foram implantadas em diferentes épocas. Neste trabalho, a primeira etapa consistiu em verificar e escolher quais das estações da RBMC seriam

utilizadas. Para isso, levaram-se em consideração três critérios. O primeiro critério refere-se à escolha de estações vinculadas à rede de nivelamento geométrico. O segundo critério está relacionado com a localização geográfica das estações, de modo que a escolha das estações levasse em conta diferentes regiões do país (norte, sul, sudeste, centro-oeste e nordeste). O terceiro critério foi escolher um número maior de estações localizadas na região Sul do país.

Nesta pesquisa, foram utilizadas dezoito estações da RBMC (BAVC, BRAZ, CRAT, CUIB, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA, ONRJ, POAL, PRGU, PRMA, RECF, RIOD, SCCH, SCLA, SMAR e UFPR), conforme ilustra a FIGURA 9.

FIGURA 9 - ESTAÇÕES RBMC UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO



FONTE: O autor (2017).

A escolha da estação também levou em consideração a verificação da disponibilidade de dados referentes às soluções semanais de posicionamento GPS para as estações. Na TABELA 3, observa-se a data do início das atividades de monitoramento das respectivas estações, além das suas respectivas localidades e os valores das altitudes elipsoidais e os valores das altitudes normais ortométricas

das estações que possuem vínculo com a Rede de Nivelamento que constam na monografia das estações.

TABELA 3 - INÍCIO DE MONITORAMENTO DAS ESTAÇÕES

Estações Utilizadas da RBMC				
Estação	Início de Monitoramento	Localização	Altitude Elipsoidal[m]	Altitude Ortométrica[m] contida no relatório da estação
BAVC	10/04/2009	Vitória da Conquista- BA	875,189	-
BRAZ*	25/06/1997	Brasília-DF	1106,018	1118,480
CRAT*	01/01/2001	Crato-CE	436,051	446,055
CUIB*	18/06/1997	Cuiabá-MT	237,443	235,344
IMBT	05/09/2007	Imbituba-SC	31,406	-
IMPZ	17/07/1997	Imperatriz-MA	105,008	-
NAUS	01/01/2006	Manaus-AM	93,890	-
NEIA*	02/01/2006	Cananéia-SP	6,058	7,974
ONRJ	30/03/2007	Rio de Janeiro-RJ	35,636	-
POAL*	04/01/1999	Porto Alegre-RS	76,745	72,148
PRGU	10/04/2009	Guarapuava-PR	1043,161	-
PRMA	10/04/2009	Maringá-PR	543,365	-
RECF*	06/01/2000	Recife-PE	20,179	25,610
RIOD*	08/02/2001	Rio de Janeiro-RJ	8,632	14,365
SCCH	03/04/2008	Chapecó-SC	744,245	-
SCLA	03/04/2008	Lages-SC	940,722	-
SMAR	07/01/2002	Santa Maria-RS	113,112	-
UFPR	05/09/2007	Curitiba-PR	925,807	-

(*) Estações com vínculo à Rede de Nivelamento

Fonte: IBGE (2017).

A definição dos períodos de análise das observações constitui a segunda etapa desta pesquisa. A obtenção dos dados combinados de injunção livre do IGS teve seu início a partir de 2012 onde foram estabelecidas as coordenadas semanais GPS. A data da aquisição de dados foi definida no período de Janeiro do ano de 2012 até Julho de 2015. Para o período em questão foram utilizadas duas realizações IGS (IGS08 e IGB08). Em termos de semana GPS, os dados estão contidos em diretórios do IBGE compreendidos da semana (ibg12P1669) até (ibg15P1856).

A terceira etapa consistiu da escolha dos modelos geopotenciais mensais cuja finalidade é fornecer dados referentes à funcional altitude geoidal visando à

análise temporal da altitude ortométrica. Os dados científicos oficiais GRACE, são gerados por três centros de processamento que determinam as soluções do campo de gravidade: GFZ, CSR e JPL. Os modelos mais recentes são denominados de GFZ Release-05, CSR Release-05 e JPL Release-05, os quais foram utilizados para a obtenção dos valores das altitudes geoidais.

Estes centros disponibilizam modelos mensais do geopotencial baseados em dados da missão GRACE. São modelos classificados como “satélite somente”, de Abril de 2002 até os dias atuais.

3.3 COMPATIBILIZAÇÃO DOS DADOS GRACE E RBMC

Para transformar os dados semanais obtidos da RBMC em dados mensais, visando sua compatibilização com os modelos mensais do GRACE, foram calculadas as médias mensais dos valores das altitudes elipsoidais, das latitudes e das longitudes das 18 estações utilizadas na pesquisa. A equação (21) mostra como foi feita a obtenção da altitude elipsoidal, onde (h_{mensal}) é a média da altitude elipsoidal mensal, (s) é o número de semanas ocorridas no mês e $(h_{semana(i)})$ é o valor da altitude elipsoidal obtido semanalmente, no caso desta pesquisa, pela RBMC.

$$h_{mensal} = \frac{\sum_{i=1}^s h_{semana(i)}}{s} \quad (21)$$

Nas equações (22) e (23) são apresentadas as formas de obtenção das latitudes e longitudes geodésicas mensais que foram utilizadas neste trabalho. A (φ_{mensal}) é a latitude geodésica mensal obtida para cada uma das estações, $(\varphi_{semana(i)})$ é o valor da latitude geodésica semanal, (λ_{mensal}) é a longitude geodésica mensal obtida para cada uma das estações, $(\lambda_{semana(i)})$ é o valor da longitude geodésica semanal.

$$\varphi_{mensal} = \frac{\sum_{i=1}^s \varphi_{semana(i)}}{s} \quad (22)$$

$$\lambda_{mensal} = \frac{\sum_{i=1}^s \lambda_{semana(i)}}{s} \quad (23)$$

Com a obtenção das médias mensais dos valores da RBMC, que configurou a quarta etapa do trabalho, foi possível fazer a compatibilização com os dados mensais GRACE. A obtenção dos dados GRACE foi feita através do *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM).

3.4 PROCESSAMENTO PELO ICGEM

Para a obtenção das informações referentes às altitudes geoidais, que configuram a quinta etapa, foram utilizados Modelos Globais do Geopotencial mensais derivados do satélite GRACE somente, GFZ Release-05, CSR Release-05 e JPL Release05. Estes modelos são disponibilizados pelo ICGEM no sítio <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home/>>. O conjunto de coeficientes de Stokes são completos até grau e ordem 90 para os GFZ Release-05 e JPL Release-05 e grau e ordem 96 para o CSR Release-05. Para a realização de testes preliminares também foi feita a limitação do desenvolvimento em série até grau e ordem 60. Este limite corresponde a uma resolução espacial de aproximadamente 334 km.

Para a determinação da altitude geoidal mensal das estações, é possível realizar o processo ponto a ponto, disponível no site do ICGEM, na opção *Calculation Service*. Esta situação requer que em seguida sejam selecionadas as opções das funcionalidades para a realização dos cálculos do campo da gravidade. No campo *Model and Reference Selection*, as opções das ferramentas são responsáveis por gerar os modelos geopotenciais, o sistema de maré, a consideração do termo de grau zero, o sistema de referência, entre outras opções que não serão discutidas aqui. Além disso, as ferramentas apresentam opções de diferentes modelos existentes.

Na ferramenta *Model Directory*, as opções são divididas em dois tipos distintos de modelo: o primeiro tipo é conhecido como *longtime models*, também chamados modelos estáticos; o segundo tipo são os modelos mensais do geopotencial. Em grande parte, são os grandes centros de pesquisas que geram o segundo tipo de MGGs. Nesta pesquisa, como abordado, as opções escolhidas para

o processamento dos dados foram: (monthly/csr-rl05/, monthly/gfz-rl05/ e monthly/jpl-rl05/).

A partir da escolha do *Model Directory*, há a opção de fazer a escolha do *Model File*. Esta opção viabiliza a escolha do mês para a determinação da altitude geoidal cuja variação temporal foi definida de Janeiro de 2012 até Julho de 2015. No botão *Functional*, é fornecido um leque de opções de variáveis do campo da gravidade onde para se obter as altitudes geoidais, é necessário selecionar a função “*geoid*”.

O *Tide System* é a ferramenta que tem por objetivo selecionar o tipo de modelo de maré permanente que é escolhido para efeito de cálculo, para a compatibilização com o sistema de marés utilizado para a determinação das altitudes elipsoidais. Neste trabalho foi utilizado o *Tide Free*; pois, todos os centros de análise do ITRS usam uma correção *Tide Free*, consequentemente, o ITRF adotou a mesma opção (DENNIS; GÉRARD, 2004, p. 30). Também foi escolhido a opção do sistema de referência geocêntrico “GRS80”.

No que tange a parte do *Grid Selection*, neste trabalho, a obtenção das altitudes geoidais se deu pelo método ponto a ponto. Isto é, tanto na seleção do intervalo que compreendesse os valores limites da latitude quanto os valores limites da longitude. Foram introduzidos nestas opções os valores das médias mensais das coordenadas elipsoidais das estações que foram escolhidas para a realização deste trabalho.

Para automatizar o processo de coleta de dados, foi utilizado o programa *Single-Point GEM [Global Earth Models] Generator* (SPGG) (Nicácio Junior e Dalazoana, 2016), que fornece extratos dos modelos globais do geopotencial de forma pontual, utilizando listas de pontos, com as coordenadas em latitude e longitude, para a determinação das altitudes geoidais. Na FIGURA 10, é mostrada a janela do programa, com as mesmas funcionalidades requeridas pelo ICGEM. Devido à recente mudança no site do ICGEM, ocorrida em maio de 2017, o programa SPGG foi atualizado para a nova versão denominada de SPGG – v. 2.0.

Após a escolha das funcionalidades necessárias para o processamento das altitudes geoidais em cada modelo geopotencial, para as estações utilizadas neste trabalho, foram gerados os valores de altitude geoidal efetivando o procedimento

start computation, no programa SPGG, na opção de gerar modelo. O procedimento finaliza com a obtenção das funcionais do campo de gravidade, através da coleta dos valores que foram processados via internet.

FIGURA 10 - JANELA DO PROGRAMA SPGG

FONTE: NICÁCIO JUNIOR (2016)

3.5 COMPARAÇÕES DOS DADOS GRACE E RBMC

A comparação entre as séries temporais de altitudes ortométricas, geradas a partir do conhecimento das altitudes geoidais provenientes dos MGGs mensais do satélite GRACE, e as séries temporais de altitudes elipsoidais provenientes dos dados GPS das estações da RBMC, é dada pelo cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, que mede o grau de correlação entre as duas variáveis, e a determinação da reta de regressão (tendência) linear.

3.5.1 Coeficiente de Correlação Linear

O coeficiente de correlação linear entre duas variáveis, X e Y , é comumente denominado de coeficiente de correlação linear de Pearson, também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto (CHEN e POPOVICH, 2002). A correlação é estimada em função da covariância entre X e Y [$COV(X,Y)$], descrevendo assim a dependência linear entre elas. A equação (24) mostra como é feito o cálculo do coeficiente de correlação linear (ρ), onde X é uma variável normalmente distribuída, com desvio padrão (σ_X), e Y é uma variável também normalmente distribuída com desvio padrão (σ_Y).

$$\rho_{XY} = \rho = \frac{COV(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (24)$$

A covariância, dada pela equação (25) é uma medida para exprimir a correlação entre duas variáveis, a dependência entre as componentes, sendo (μ_X) a média da variável X , (μ_Y) a média da variável Y e (n) sendo o número de observações:

$$COV(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{(x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)\} \quad (25)$$

Os valores σ_X e σ_Y , referentes aos desvios padrão de X e Y são calculados conforme as equações (26) e (27), respectivamente:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad (26)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{n \sum y^2 - (\sum y)^2}{n^2}} \quad (27)$$

3.5.2 Reta de Tendência - Regressão Linear

A análise de regressão consiste em funções que representam modelos matemáticos que relacionam o comportamento entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes, assim como são utilizadas para estimar os parâmetros do comportamento sistemático entre as mesmas (CONOVER, IMAN, 1982).

Os modelos de regressão linear simples são funções matemáticas que são ajustadas para relacionar duas variáveis X e Y . A variável X é a variável independente da equação enquanto Y é a variável dependente das variações de X . O modelo de regressão é chamado de simples quando envolve uma relação causal entre duas variáveis. Para o ajustamento da reta de regressão, tem-se a função afim, representada na equação (28) (CONOVER, IMAN, 1982):

$$Y = cX + l \quad (28)$$

No qual o coeficiente angular (c) e o coeficiente linear (l) são determinados de acordo com as equações (29) e (30), onde: (x) são os valores independentes da função e (y) são os valores dependentes e (n) o número de observações dos pares (x, y):

$$c = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum(x^2)) - (\sum x)^2} \quad (29)$$

$$l = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum(x^2)) - (\sum x)^2} \quad (30)$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para este trabalho de dissertação. Primeiramente, foram determinados os valores das altitudes ortométricas a partir dos dados GNSS e de altitude geoidal obtidos dos diferentes modelos mensais do geopotencial provenientes dos diferentes centros de processamento, em seguida foram gerados os gráficos visando a comparação entre as séries temporais de altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas das 18 estações escolhidas da RBMC; num segundo momento foram calculados os valores das correlações entre as diferentes séries temporais de altitudes ortométricas e a série temporal de altitude elipsoidal e também entre as séries temporais de altitudes geoidais e de altitudes elipsoidais. Finalmente a taxa de variação anual das séries temporais das altitudes foi determinada.

4.1 CÁLCULO DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS

As altitudes ortométricas foram determinadas pela diferença entre as altitudes elipsoidais e as altitudes geoidais para o período de tempo sob análise e, levando em consideração os diferentes modelos globais do geopotencial e graus de desenvolvimento. A TABELA 4 mostra um resumo do cálculo das altitudes ortométricas para o ano de 2014, na estação UFPR. Neste exemplo as altitudes geoidais foram obtidas do modelo GFZ_Release-05 desenvolvido até o grau90.

Para as estações da RBMC com vínculo à rede de nivelamento (estações BRAZ, CRAT, CUIB, NEIA, POAL, RECF e RIOD), os valores calculados das altitudes ortométricas ($H \approx h - N$) foram comparados com os valores conhecidos das altitudes ortométricas. Estes valores conhecidos são provenientes do nivelamento geométrico das estações e podem ser obtidos do relatório da estação geodésica disponível no Banco de Dados Geodésicos do IBGE. Os valores conhecidos das altitudes ortométricas dos pontos foram apresentados anteriormente na Tabela 3, já as altitudes ortométricas calculadas para as estações, no período sob análise, são apresentadas por meio de gráficos da série temporal, disponíveis no Apêndice 1 deste trabalho.

TABELA 4 - VALORES DAS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS – ESTAÇÃO UFPR

Mês e Ano	Altitude Elipsoidal [m]	Altitude Geoidal (GFZ_Release05_90) [m]	Altitude Ortométrica [m]
jan/14	925,777	1,380	924,397
fev/14	925,777		
mar/14	925,769	1,369	924,400
abr/14	925,768	1,357	924,410
mai/14	925,771	1,368	924,404
jun/14	925,773	1,363	924,410
jul/14	925,772		
ago/14	925,774	1,355	924,419
set/14	925,778	1,348	924,431
out/14	925,779	1,361	924,419
nov/14	925,781	1,366	924,415
dez/14	925,781		

Fonte: O autor (2017)

Das estações com vínculo à Rede de Nivelamento, pôde-se verificar que a diferença entre a altitude conhecida e a calculada é de ordem decimétrica para as estações BRAZ, CRAT, CUIB, NEIA, POAL e RIOD. Porém, para a estação de RECF a diferença chega a aproximadamente 2,7m quando no cálculo da altitude ortométrica utiliza-se o modelo desenvolvido até grau 60. Não foi possível verificar a origem desta diferença, fato este que merece estudos futuros.

Com relação aos MGGs, uma importante observação é que, nos meses de Maio e Outubro de 2012, Março, Agosto e Setembro de 2013, Fevereiro, Julho e Dezembro de 2014 e Junho de 2015, não foram disponibilizados os modelos mensais do satélite GRACE. Segundo Ries³ (2017), este fato é resultado do descarregamento das baterias do satélite, que não suportaram operações científicas durante estes meses. Além disso, para os meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2015 o ICGEM não disponibilizou os dados dos modelos do CSR Release-05 e para

³RIES, J. C. **GRACE data** [Mensagem pessoal]. Mensagem Recebida por: <antonioc.cagido@gmail.com>. 31 jan 2017.

os modelos do JPL Release-05 de grau: 90, não há dados entre os períodos de Março de 2012 a Agosto de 2012 e Outubro de 2014 a Julho de 2015.

4.2 GRÁFICOS DA VARIAÇÃO TEMPORAL DAS ALTITUDES

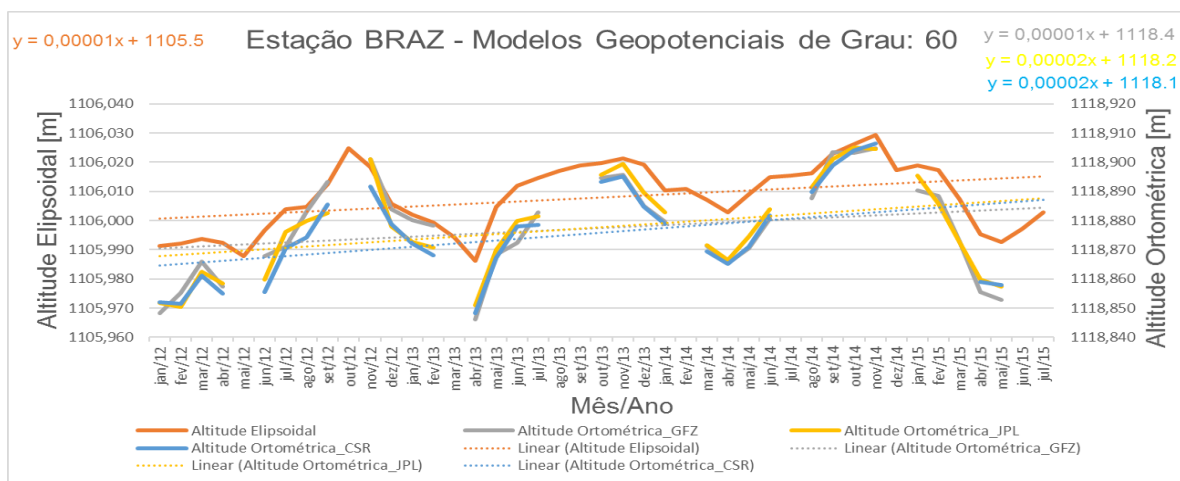
Foram gerados gráficos das séries temporais de altitude elipsoidais e ortométricas, compreendendo o período de Janeiro de 2012 até Julho de 2015. Cada gráfico apresenta, para uma estação, a série temporal da altitude elipsoidal e três séries temporais de altitude ortométrica calculadas a partir dos modelos mensais do geopotencial (uma para cada modelo mensal, desenvolvido pelos três centros de processamento: JPL, GFZ e CSR). Além disso, os gráficos levaram em conta diferentes graus de desenvolvimento dos MGGs, sendo eles: 60, 90 e 96. No caso do grau 96, o gráfico foi feito somente para o modelo CSR Release-05, que é o único modelo, dentre os utilizados nesta pesquisa que disponibiliza os coeficientes de Stokes até esse grau..

Para as 18 estações, foram gerados um total de 54 gráficos, que estão no Apêndice 1. No eixo das ordenadas são apresentados os valores das altitudes, do lado esquerdo os valores das altitudes elipsoidais e do lado direito os das altitudes ortométricas. O eixo das abscissas indica a época. A seguir apresentam-se alguns exemplos de gráficos gerados, para os diferentes graus de desenvolvimento dos modelos.

4.2.1 Análise dos Gráficos – MGG mensais desenvolvidos até o grau 60

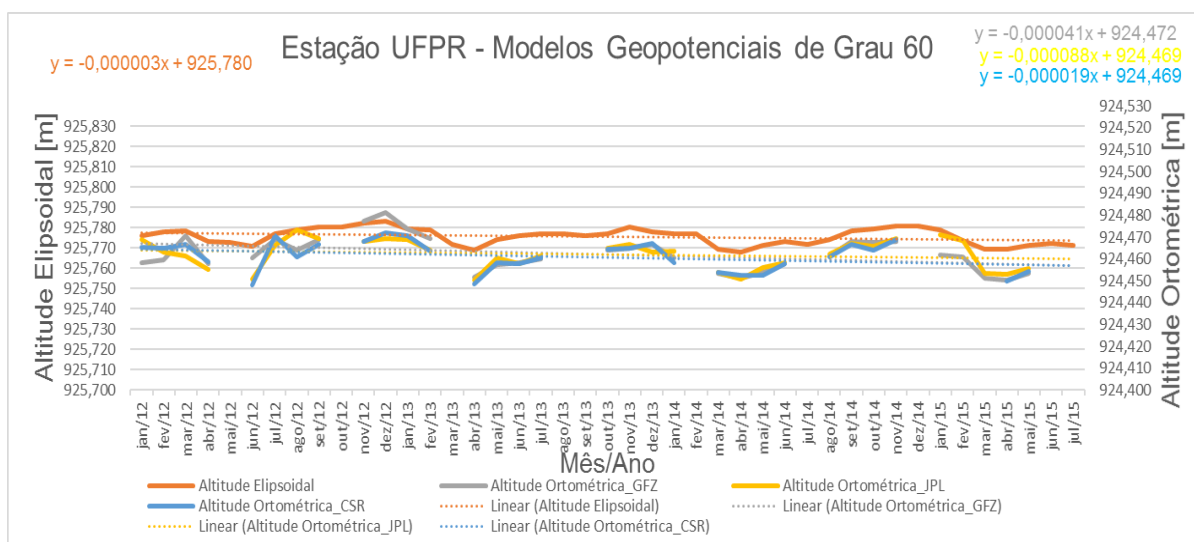
Os gráficos aqui apresentados mostram a comparação das séries temporais da altitude elipsoidal com as altitudes ortométricas obtidas pelos modelos do geopotencial desenvolvidos até o grau 60, pelos centros de pesquisa, CSR, JPL e GFZ. No GRÁFICO 1, da estação BRAZ, é possível observar que tanto a variação das altitudes ortométricas como da altitude elipsoidal ao longo do tempo fornecem um indicativo de soerguimento da crosta. Já no GRÁFICO 2, da estação UFPR, há um indicativo de subsidência da crosta tanto na série temporal da altitude elipsoidal quanto nas das altitudes ortométricas. As taxas de variação anual serão apresentadas no item 4.3.

GRÁFICO 1 - ESTAÇÃO BRAZ_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60



Fonte: O autor (2017).

GRÁFICO 2 - ESTAÇÃO UFPR_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60

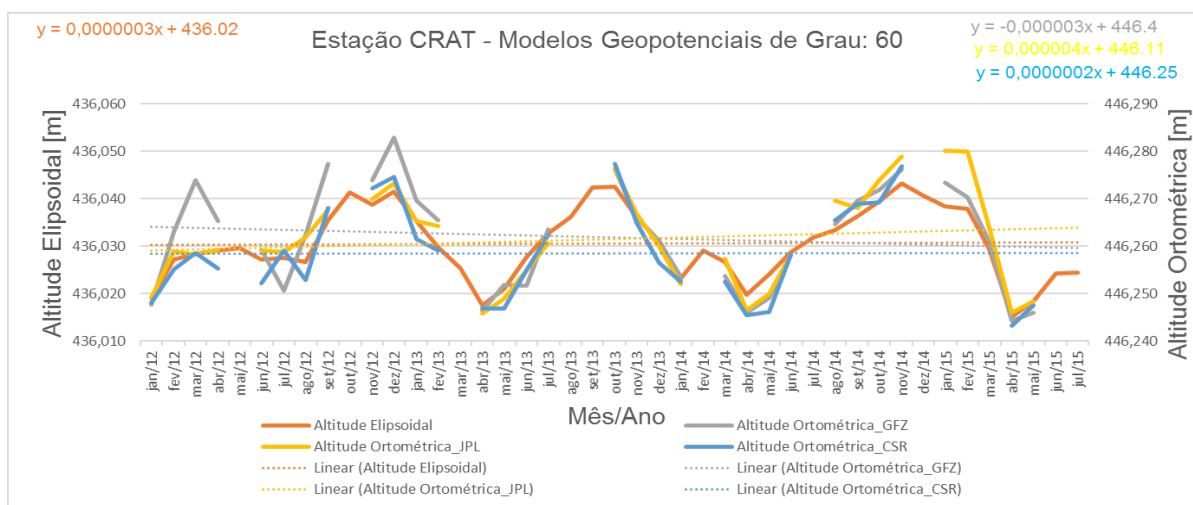


Fonte: O autor (2017).

Da análise dos gráficos gerados (Apêndice 1), é possível verificar que não há uma generalização para cada estação no indicativo de soerguimento ou de subsidência da crosta, quando os três modelos são comparados entre si. Existem casos em que numa mesma estação, os diferentes centros podem proporcionar relações distintas da variação das altitudes ortométricas calculadas. Um exemplo disso, está ilustrado no GRÁFICO 3 referente a estação CRAT, onde os valores da altitude ortométrica para o GFZ indicam subsidência, enquanto que para os modelos do CSR e do JPL a tendência da altitude ortométrica indica um soerguimento da crosta para o período em estudo. De forma geral, os três modelos indicaram a

mesma tendência de variação da altitude ortométrica (positiva ou negativa – de soerguimento ou de subsidência) em 14 das 18 estações analisadas (BRAZ, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA, ONRJ, POAL, PRGU, RECF, RIOD, SCCH, SCLA, SMAR e UFPR). Em todas essas estações, com exceção da estação POAL a tendência de variação da altitude ortométrica é a mesma tendência da altitude elipsoidal.

GRÁFICO 3 - ESTAÇÃO CRAT_ MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 60



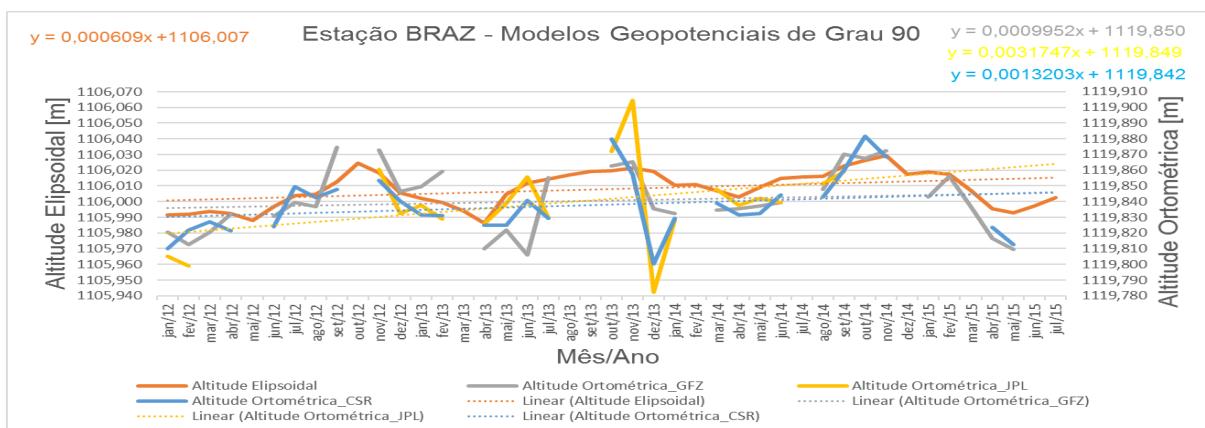
Fonte: O autor (2017).

4.2.2 Análise dos Gráficos – MGG mensais desenvolvidos até grau 90 e 96

Aqui serão apresentados os gráficos referentes aos MGGs desenvolvidos até grau 90. No GRÁFICO 4, a estação BRAZ apresenta um indicativo de soerguimento, tanto na análise da série temporal referente à altitude elipsoidal quanto das altitudes ortométricas. Já há um indicativo de subsidência na estação UFPR, apresentada no GRÁFICO 5, e na estação CRAT, enquanto a altitude elipsoidal mostra indicativo de soerguimento, os valores das altitudes ortométricas mostram indicativo de subsidência, como apresentado no GRÁFICO 6.

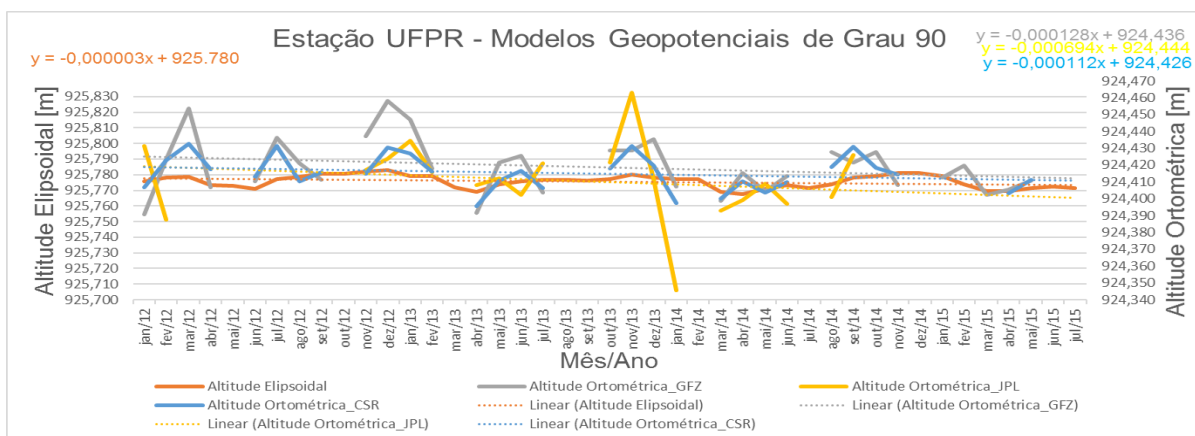
Para o desenvolvimento até grau 90, os três modelos indicaram a mesma tendência de variação da altitude ortométrica em 10 das 18 estações analisadas (BRAZ, IMBT, IMPZ, NEIA, ONRJ, PRGU, RECF, RIOD, SCCH e UFPR). Em todas essas estações a tendência de variação da altitude ortométrica é a mesma tendência da altitude elipsoidal.

GRÁFICO 4 - ESTAÇÃO BRAZ_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90



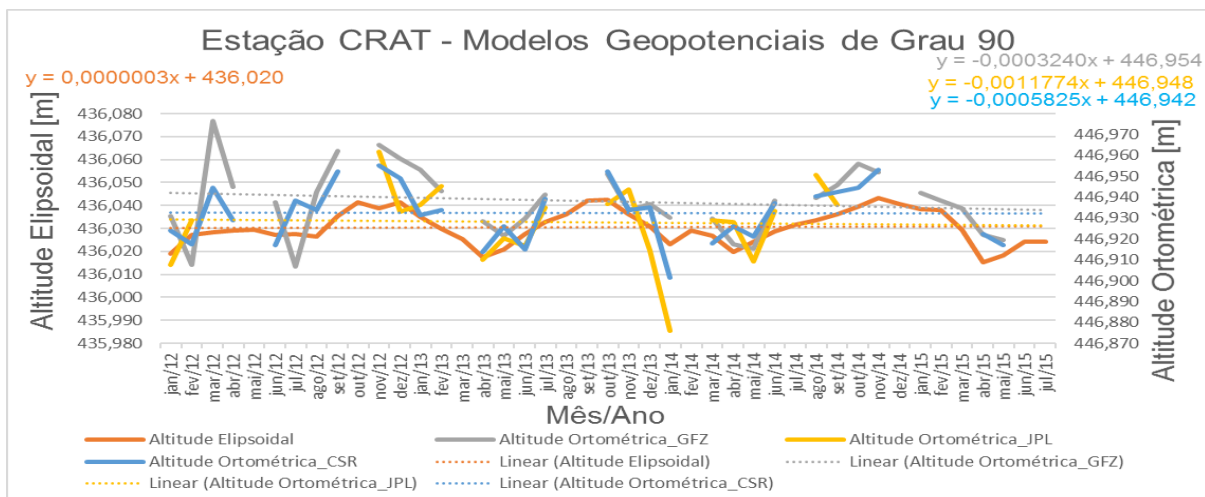
Fonte: O autor (2017).

GRÁFICO 5 - ESTAÇÃO UFPR_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90



Fonte: O autor (2017).

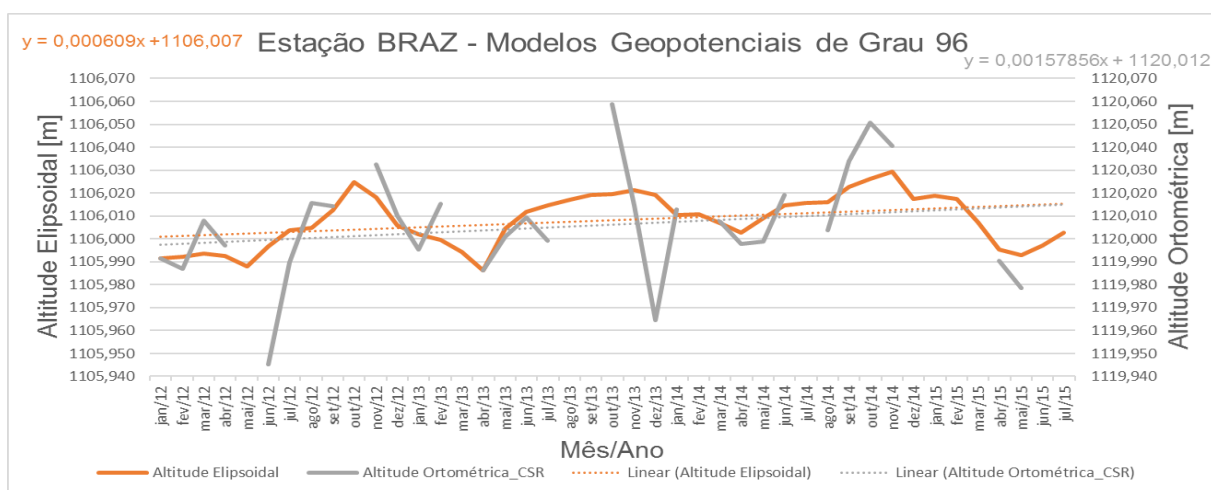
GRÁFICO 6 - ESTAÇÃO CRAT_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 90



Fonte: O autor (2017).

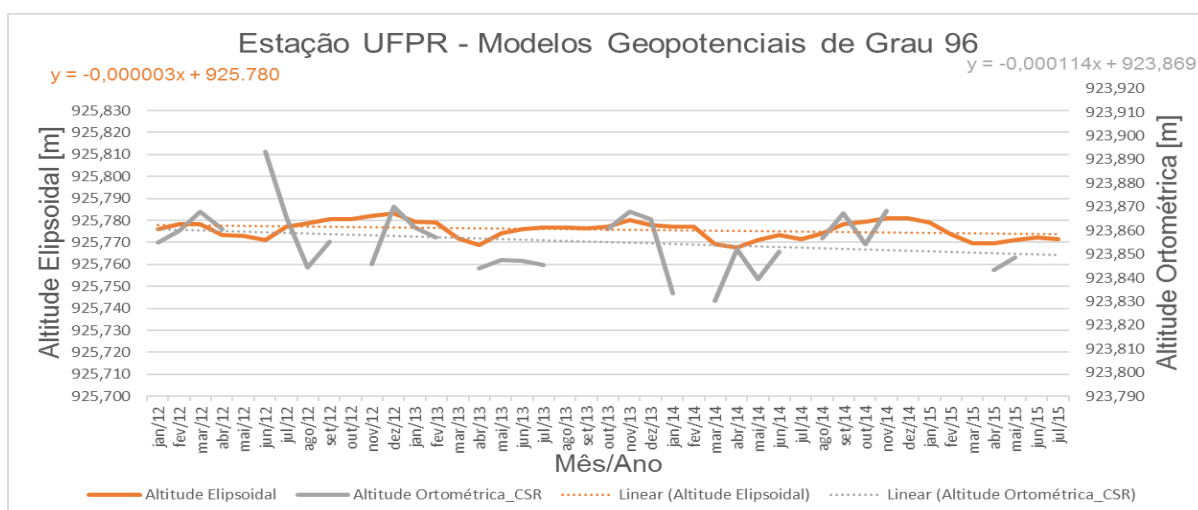
Na sequência são apresentados os gráficos referentes aos MGGs desenvolvidos até grau 96. No GRÁFICO 7, a estação BRAZ apresenta um indicativo de soerguimento, tanto na análise da série temporal referente à altitude elipsoidal quanto das altitudes ortométricas. Já há indicativo de subsidência na estação UFPR, apresentada no GRÁFICO 8, e na estação CRAT, enquanto a altitude elipsoidal mostra indicativo de soerguimento, os valores das altitudes ortométricas mostram indicativo de subsidência, como apresentado no GRÁFICO 9.

GRÁFICO 7 - ESTAÇÃO BRAZ_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 96



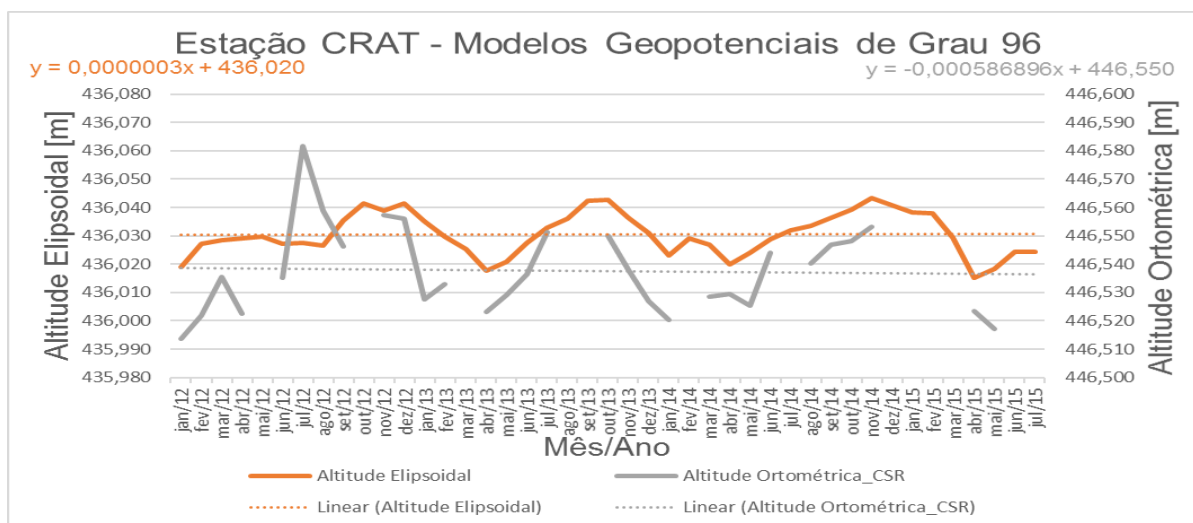
Fonte: O autor (2017).

GRÁFICO 8 - ESTAÇÃO UFPR_MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 96



Fonte: O autor (2017).

GRÁFICO 9 - ESTAÇÃO CRAT_ MGG DESENVOLVIDO ATÉ GRAU 96



Fonte: O autor (2017).

Da análise dos gráficos elaborados com o modelo desenvolvido até grau 96, pôde-se perceber que em 15 estações a tendência de variação da altitude elipsoidal tem o mesmo sentido da tendência de variação da altitude ortométrica (BRAZ, CUIB, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA, ONRJ, PRGU, PRMA, RECF, RIOD, SCCH, SCLA, SMAR e UFPR).

De maneira geral, os gráficos gerados a partir do modelo global do geopotencial desenvolvido até o grau 96, apresentaram as maiores diferenças entre as altitudes ortométricas, quando comparadas mensalmente. E os gráficos gerados a partir dos modelos globais do geopotencial desenvolvidos até o grau 60, foram os que apresentaram as melhores regularidades entre as altitudes ortométricas.

4.3 TAXA DE VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAI E ORTOMÉTRICAS

A variação média anual ($Var_{anual(altitude)}$) das altitudes elipsoidais e ortométricas, se dá pela razão da função da altitude pelo tempo em anos. Na equação (31), considera-se que a função $f(a)$ e $f(b)$ são os valores das altitudes elipsoidais ou altitudes ortométricas no intervalo temporal mensal (a, b) dividido por 12, para calcular o período anual.

$$Var_{anual(altitude)} = \frac{f(b) - f(a)}{(b - a)/12} \quad (31)$$

Para esta pesquisa, foi gerada a TABELA 5, que mostra a variação média anual das altitudes em milímetros para as estações analisadas, levando em consideração os diferentes centros de pesquisa e graus de desenvolvimento dos modelos. De todas as estações analisadas, apenas as estações NEIA e ONRJ, tiveram variações anuais maiores que 10 mm/ano.

TABELA 5 - VARIAÇÕES ANUAIS DAS ALTITUDES

Estação	Altitude Elipsoidal	Variação das Altitudes Ortométricas (mm/ano)						
	Variação (mm/ano)	CSR			GFZ		JPL	
		60	90	96	60	90	60	90
BAVC	0,7	1,0	3,9	-4,8	-2,5	-2,2	1,0	-1,2
BRAZ	4,1	6,8	4,8	5,5	3,8	2,7	5,6	7,3
CRAT	0,5	0,3	-0,1	-0,6	-1,3	-2,3	1,3	-1,4
CUIB	2,4	1,4	0,6	0,6	-0,9	-2,6	1,2	-5,3
IMBT	-2,9	-3,6	-2,4	-2,8	-4,2	-8,1	-2,4	-8,7
IMPZ	-3,9	-3,4	-2,8	-2,8	-5,5	-5,4	-4,4	-5,8
NAUS	4,4	2,4	3,1	6,0	1,6	0,5	4,4	-3,7
NEIA	-11,0	-12,0	-11,0	-10,0	-13,0	-15,0	-11,0	-8,0
ONRJ	10,8	12,3	11,9	15,0	10,1	10,0	12,3	11,4
POAL	0,5	-0,8	-3,4	-1,6	-2,6	2,2	-1,9	1,2
PRGU	-2,7	-3,7	-4,3	-3,1	-5,7	-4,6	-4,9	-2,8
PRMA	2,5	1,5	0,5	2,2	-1,4	-1,3	0,9	0,9
RECF	-2,6	-2,3	-2,3	-1,0	-4,4	-4,4	-3,9	-2,3
RIOD	7,1	8,5	7,9	10,8	6,5	6,4	8,8	6,8
SCCH	-0,2	-1,3	-0,6	-1,3	-3,4	-5,5	-3,1	-10,1
SCLA	-0,2	-1,5	-2,7	-2,9	-2,9	0,8	-1,7	5,7
SMAR	4,9	3,9	6,2	3,9	2,6	-2,2	2,3	5,0
UFPR	-1,2	-2,1	-2,3	-3,1	-2,9	-3,7	-1,1	-5,7

Fonte: O autor (2017).

Em relação aos resultados fornecidos pelos três modelos, mas para um mesmo grau de desenvolvimento, na análise das variações anuais das altitudes elipsoidais e ortométricas, mostrada na tabela precedente, sete estações (BAVC, CRAT, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA e UFPR) têm os valores de diferença entre as taxas de variação entre a altitude elipsoidal e a altitude ortométrica abaixo de 1

milímetro, obtidos pelo modelo JPL Release-05 de grau 60, o que compreende cerca de 38,9% das estações utilizadas na pesquisa.

Em relação ao modelo CSR Release-05 de grau 60, as diferenças entre as taxas de variação da altitude elipsoidal e da altitude ortométrica é menor do que o milímetro para as estações (BAVC, CRAT, IMBT, IMPZ, POAL, RECF e UFPR) o que compreende também 38,9% das estações. Para o modelo GFZ Release-05, desenvolvido até o grau 60, são verificados valores aproximados para a variação das altitudes em quatro estações (BRAZ, CRAT, RIOD e RIOD) que corresponde cerca de 22,2% das estações utilizadas na pesquisa.

A tabela mostra também, para a análise através dos modelos desenvolvidos até grau 90, que o JPL Release-05 fornece variação anual, abaixo de um milímetro, da altitude ortométrica quando comparada com a variação da altitude elipsoidal para seis estações (ONRJ, POAL, PRGU, RECF RIOD e SMAR), o que equivale a 33,3% das estações. Já para o modelo do CSR, a taxa de variação é aproximada para as estações (BRAZ, CRAT, IMBT, NEIA, RECF, RIOD e SCCH) o que compreende cerca de 38,9%, e para o modelo GFZ, há taxa de variação aproximada entre a altitude ortométrica e a altitude elipsoidal para as estações (ONRJ e RIOD) o que compreende 11,1% das estações.

Por fim, com relação ao modelo CSR Release-05 desenvolvido até o grau 96, é possível verificar na tabela a ocorrência de variação anual igual em três estações (IMBT, PRGU e PRMA). Logo 16,67% das estações. Com esta análise, é possível afirmar que os modelos geopotenciais mensais gerados pelo centro técnico do JPL tendem a ter uma variação anual da altitude ortométrica próxima a variação anual da altitude elipsoidal.

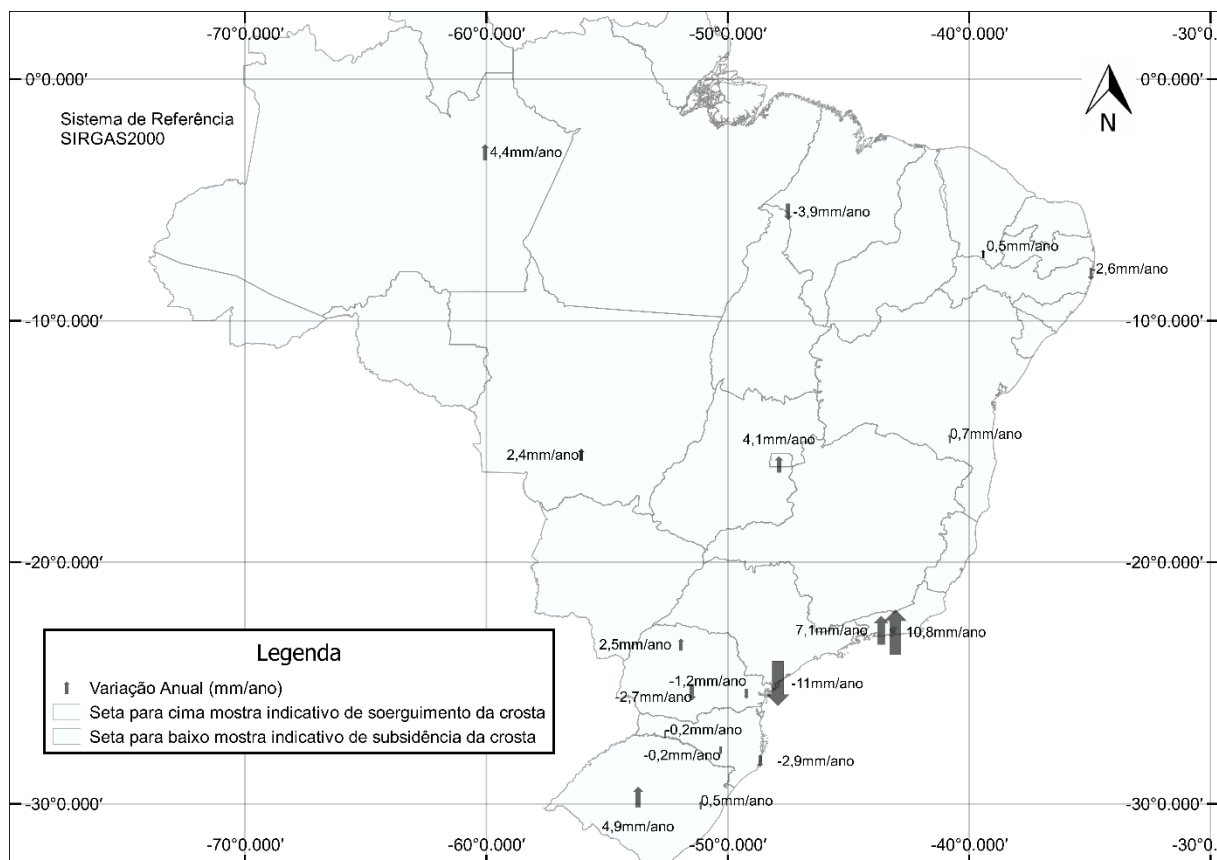
Na comparação entre as altitudes ortométricas dos diferentes modelos globais do geopotencial e para o mesmo grau de desenvolvimento, foram verificados que: os modelos que foram desenvolvidos até o grau 60 apresentaram taxa de variação anual aproximada entre os centros de pesquisas CSR e GFZ, para as estações (IMBT, NAUS e UFPR), entre os centros de pesquisas CSR e JPL, para as estações (BAVC, CUIB, ONRJ, PRMA, RIOD e SCLA) e entre os centros de pesquisas GFZ e JPL, para as estações (POAL, PRGU, RECF, SCCH e SMAR). E para os modelos que foram desenvolvidos até o grau 90, foram obtidas taxa de

variação anual abaixo de um milímetro somente entre os centros de pesquisas CSR e JPL, para as estações (ONRJ, PRMA e RECF), entre os centros de pesquisa CSR e GFZ, para a estação (PRGU) e entre GFZ e JPL para as estações (CRAT, IMBT, IMPZ e RIOD).

Ainda referente às taxas de variação anual, algumas estações tiveram reações distintas, quanto à análise das comparações das altitudes ortométricas em relação aos diferentes centros de pesquisa, levando-se em consideração o mesmo grau de desenvolvimento do modelo. Por exemplo, para os modelos globais do geopotencial desenvolvidos até o grau 60, as estações (BAVC, CRAT, CUIB e PRMA) tiveram no modelo GFZ, valores das taxas anuais negativas, enquanto para os outros modelos (CSR e JPL) os valores das taxas anuais foram positivos. Para os MGGs desenvolvidos até o grau 90, foi observado que um determinado centro de pesquisa gerou valores para as taxas de variação anual com sinal oposto aos demais centros de pesquisa, por exemplo nos casos das seguintes estações: BAVC o modelo gerado pelo CSR indicou uma taxa positiva enquanto os modelos do GFZ e JPL indicaram uma taxa negativa; CUIB os modelos CSR e GFZ indicaram taxa positiva enquanto o do JPL indicou uma taxa negativa; NAUS o modelo JPL indicou uma taxa negativa enquanto os outros indicaram taxas positivas; POAL o modelo do CSR indicou taxa negativa e os outros taxas positivas; PRMA o modelo GFZ indicou taxa negativa e os outros positivas; SCLA o modelo CSR apresentou taxa negativa e demais positivas, e finalmente para a estação SMAR o modelo GFZ indicou taxa negativa enquanto os demais indicaram uma taxa positiva.

A FIGURA 11 ilustra a variação anual das altitudes elipsoidais para uma verificação acerca do comportamento desta coordenada nas estações da pesquisa, e se para uma mesma região as variações das altitudes elipsoidais tendem a ter uma mesma ou distintas reações. Para as estações analisadas é observado que para uma mesma região há certa tendência acerca do comportamento das variações anuais. Porém no Estado do Paraná, enquanto a estação PRMA mostrou uma variação anual de 2 (mm/ano), as estações PRGU e UFPR, mostraram uma variação anual de -3 (mm/ano) e -1 (mm/ano), respectivamente. Um estudo mais aprofundado requer necessariamente o uso de mais estações na análise.

FIGURA 11 – MAPA DA VARIAÇÃO ANUAL DA ALTITUDE ELIPSOIDAL



FONTE: O autor (2017).

4.4 ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES

Para fazer a comparação dos dados das estações da RBMC utilizadas na pesquisa (altitudes elipsoidais), com os valores obtidos das altitudes ortométricas, foram utilizadas as formulações referentes a determinação da correlação linear apresentadas na seção 3.5.1. A TABELA 6 indica os valores das correlações entre as séries temporais das altitudes elipsoidais e as séries temporais das altitudes ortométricas derivadas a partir dos modelos mensais do GRACE, levando em consideração os diferentes centros de pesquisa e diferentes desenvolvimentos em grau dos modelos. Esta análise permitiu avaliar a compatibilidade dos resultados referentes aos modelos gerados pelos três diferentes centros (CSR, JPL e GFZ). Além disso, permite avaliar em qual grau de desenvolvimento dos modelos ocorrem as melhores correlações.

A primeira informação que se pode obter da TABELA 6 faz referência a generalização de que nos modelos desenvolvidos até o grau 60 têm-se as correlações mais fortes. Nos modelos do geopotencial CSR Release-05 e JPL Release-05 desenvolvidos até grau 60, todas as estações tem correlação mais forte com os dados das altitudes elipsoidais, comparados com os outros desenvolvimentos dos modelos gerados por estes centros de processamento.

TABELA 6 - CORRELAÇÕES ENTRE AS ALTITUDES ELIPSOIDAIS E ORTOMÉTRICAS

VALORES DAS CORRELAÇÕES DAS ESTAÇÕES RBMC							
Correlação entre as séries temporais de Altitudes Elipsoidais e Altitudes Ortométricas							
MODELOS	GNSS-CSR_60	GNSS-GFZ_60	GNSS-JPL_60	GNSS-CSR_90	GNSS-GFZ_90	GNSS-JPL_90	GNSS-CSR_96
BAVC	0,8656	0,6502	0,8583	0,7076	0,6661	0,5512	0,6933
BRAZ	0,9689	0,9240	0,9685	0,7074	0,7471	0,5337	0,6375
CRAT	0,9629	0,9146	0,9510	0,7718	0,6522	0,6564	0,5870
CUIB	0,9360	0,8867	0,9446	0,7037	0,6948	0,6656	0,6599
IMBT	0,9072	0,8922	0,7424	0,4538	0,5197	0,4354	0,3951
IMPZ	0,9695	0,9595	0,9708	0,8436	0,8730	0,8420	0,7134
NAUS	0,9886	0,9706	0,9856	0,9547	0,9326	0,9485	0,9270
NEIA	0,9926	0,9719	0,9931	0,9666	0,9936	0,9425	0,9620
ONRJ	0,9781	0,9477	0,9794	0,7981	0,8341	0,6788	0,8973
POAL	0,8393	0,5359	0,7049	0,3112	0,4013	0,4769	0,4301
PRGU	0,8817	0,8493	0,9311	0,7832	0,4714	0,3132	0,6554
PRMA	0,8538	0,7951	0,8839	0,5974	0,4300	0,4644	0,5087
RECF	0,8995	0,7997	0,8898	0,2970	0,6873	0,1971	0,3238
RIOD	0,9652	0,9222	0,9776	0,6486	0,7479	0,5373	0,8198
SCCH	0,7516	0,5625	0,5780	0,0659	0,0377	0,4167	0,1926
SCLA	0,8040	0,6590	0,8039	0,3650	0,5455	0,1092	0,3261
SMAR	0,9223	0,8248	0,7589	0,6229	0,2439	0,2835	0,4881
UFPR	0,8963	0,8940	0,8695	0,5951	0,6037	0,3589	0,3015

Fonte: O autor (2017).

Em relação ao modelo GFZ Release-05, as estações BAVC e NEIA têm no grau 60 uma correlação um pouco mais fraca, comparada com o mesmo modelo desenvolvido no grau 90, logo 11,11% das estações analisadas para o GFZ possui no modelo desenvolvido até grau 90 maior correlação quando comparado com o modelo desenvolvido até grau 60.

A forte correlação entre as altitudes elipsoidais e ortométricas, indica que o comportamento do geóide nestas estações não sofre variação significativa. Ou seja, que o acompanhamento temporal das altitudes elipsoidais com GNSS traz uma boa indicação do que acontece com a coordenada altimétrica (ou vertical) dos pontos ao longo do tempo.

Com os resultados apresentados na tabela também é possível realizar, para cada grau de desenvolvimento dos modelos geopotenciais, uma comparação da correlação das altitudes entre os três centros de processamento. Ou seja, para qual centro de processamento e para qual grau de desenvolvimento tem-se as melhores correlações. No modelos do geopotencial desenvolvidos até o grau 60, o CSR Release-05 apresenta onze estações com maior correlação entre as séries de altitudes elipsoidais e ortométricas, o JPL Release-05 apresenta sete estações com a maior correlação e o GFZ Release-05 com nenhuma estação. Já para o grau 90, o modelo GFZ Release-05 apresenta o maior número de estações (nove estações) com as maiores correlações; para, o modelo do CSR são sete estações, e por fim, o modelo do JPL apresenta duas estações com a correlação mais forte.

TABELA 7 - CORRELAÇÕES ENTRE AS ALTITUDES ELIPSÓIDAIAS E GEOIDAIAS

VALORES DAS CORRELAÇÕES DAS ESTAÇÕES RBMC							
Correlação entre as séries temporais de Altitudes Elipsoidais e Altitudes Geoidais							
MODELOS	GNSS-CSR_60	GNSS-GFZ_60	GNSS-JPL_60	GNSS-CSR_90	GNSS-GFZ_90	GNSS-JPL_90	GNSS-CSR_96
BAVC	-0,3821	-0,3918	-0,4015	-0,4587	-0,2691	-0,3235	-0,4814
BRAZ	-0,7094	-0,5160	-0,7245	-0,1406	-0,2619	-0,1557	-0,1845
CRAT	-0,5406	-0,4553	-0,5337	-0,3142	-0,2293	-0,3223	-0,1033
CUIB	-0,6216	-0,4971	-0,6708	-0,1136	-0,1929	-0,2450	-0,1840
IMBT	-0,2717	-0,4662	-0,0533	-0,0654	-0,2649	-0,2135	-0,0323
IMPZ	-0,7970	-0,8161	-0,8226	-0,5270	-0,6168	-0,5729	-0,3983
NAUS	-0,9050	-0,7606	-0,8804	-0,7539	-0,6352	-0,6691	-0,6731
NEIA	0,0697	-0,1555	0,2429	0,0355	-0,2571	-0,1914	0,1163
ONRJ	-0,3999	0,0869	-0,5124	-0,0490	0,0996	0,0858	-0,4682
POAL	-0,0582	0,0706	0,0325	-0,0262	-0,0921	-0,2458	-0,1908
PRGU	-0,3047	-0,4548	-0,5786	-0,3588	-0,0520	-0,0751	-0,3702
PRMA	-0,1912	-0,2314	-0,1504	0,0449	0,0823	0,1483	-0,0210
RECF	0,1203	-0,3903	-0,4797	0,1886	-0,3455	0,0807	0,1970
RIOD	-0,4000	0,0067	-0,6280	0,0588	0,1696	0,2024	-0,2853
SCCH	-0,1047	-0,1130	-0,1156	0,2044	0,2196	-0,2428	0,0891
SCLA	-0,1637	-0,1052	-0,1915	-0,0287	-0,2986	0,1511	-0,0287
SMAR	0,4350	0,3762	0,3383	-0,1515	0,4279	0,1743	0,1749
UFPR	-0,5296	-0,6109	-0,4186	-0,2136	-0,3925	-0,1775	0,0352

FONTE: O autor (2017).

A TABELA 7 precedente apresenta os valores das correlações entre as séries temporais de altitudes elipsoidais e as séries temporais das altitudes geoidais. Nesta tabela é possível observar que grande parte dos valores das correlações são negativos e que na maioria das estações os valores estão compreendidos entre $[-0,5; 0,5]$ o que indica que as correlações são fracas.

Apenas duas estações, IMPZ e NAUS, mostram valores menores que $-0,5$ nas correlações entre as altitudes elipsoidais e geoidais, uma situação que indica uma forte correlação negativa.

Logo, os dados da TABELA 7 confirmam os resultados apresentados na TABELA 6, em que sendo os valores das correlações das altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas mais fortes e entre as altitudes elipsoidais e altitudes geoidais mais fracas, nestes casos, mostram que o comportamento do geoide nestas estações não sofre variação significativa.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como um dos objetivos, verificar a potencialidade da utilização de modelos mensais do geopotencial, derivados da missão GRACE, e gerados pelos diferentes centros de processamento CSR, GFZ e JPL, para analisar a variação temporal da componente vertical (altitudes) em estações da RBMC. A verificação considerou a funcional altitude geoidal, gerada pelos modelos, desenvolvido nos graus 60, 90 e 96. O acompanhamento temporal da coordenada vertical considerou a comparação das altitudes elipsoidais, provenientes de dados injuncionados ao IGS, com as altitudes ortométricas, calculadas a partir da diferença entre as altitudes elipsoidais e altitudes geoidais.

A carência de estudos que abordam o tema do monitoramento temporal das componentes verticais em nosso país, associada a disponibilidade de modelos mensais do geopotencial baseados na missão GRACE, também influenciou a escolha do tema proposto. Os estudos começaram com a determinação das estações RBMC que teriam suas componentes verticais analisadas e cuja série temporal compreendesse o mesmo período de disponibilidade de MGGs mensais. As informações de coordenadas das estações RBMC foram obtidas em coordenadas tridimensionais cartesianas e transformadas para coordenadas elipsoidais.

A metodologia empregada para fazer as comparações entre as altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas foi baseada em cálculos estatísticos (regressão linear, taxas de variação anual e correlações entre as altitudes elipsoidais e ortométricas). Em relação aos gráficos, podem-se observar quando as variações das altitudes elipsoidais e das altitudes ortométricas ao longo do tempo forneciam um indicativo de soerguimento ou de subsidência da crosta, além de apresentar os valores da reta de tendência.

De maneira geral, as altitudes ortométricas determinadas através dos modelos globais do geopotencial apresentaram regularidades com os valores das altitudes ortométricas das estações (BRAZ, CRAT, CUIB, NEIA, POAL e RIOD) com vínculo à Rede de Nivelamento. Porém, a estação RECF apresentou uma significativa diferença quando comparadas as altitudes ortométricas obtidas por meio

dos modelos mensais do geopotencial e a altitude ortométrica que consta no relatório da estação RECF. Neste trabalho, não foi possível localizar a origem desta diferença, sendo necessários maiores estudos com relação a esta estação da RBMC.

Em relação à análise das variações anuais das altitudes ortométricas, os valores obtidos com os modelos JPL Release-05 de grau 60 e JPL Release-05 de grau 90, foram os mais próximos dos valores das variações anuais das altitudes elipsoidais, quando comparados com os modelos gerados pelos outros centros de processamento e comparados com os mesmos graus. Estes modelos apresentaram diferenças menores do que o milímetro entre as taxas de variação anual da altitude ortométrica e da altitude elipsoidal em 38,9% e 33,3% das estações respectivamente.

As análises das variações das altitudes para o modelo global do geopotencial CSR Release-05 desenvolvido até o grau 96, mostrou uma ocorrência idêntica em três das dezoito estações analisadas (IMBT, PRGU e PRMA). Logo 16,67% das estações.

Foi observado que as taxas de variação anual da altitude ortométrica gerada a partir dos diferentes centros de pesquisa CSR, GFZ e JPL para algumas estações analisadas, apresentaram diferentes sinais. Ou seja, para uma mesma estação e para o mesmo grau de desenvolvimento, enquanto um determinado centro de pesquisa apresentava variação anual positiva na altitude ortométrica, os outros centros de pesquisa apresentaram variação anual negativa.

O mapa da variação anual da altitude elipsoidal mostrou que, para as estações analisadas, para uma mesma região há certa tendência acerca do comportamento das variações anuais. Porém no Estado do Paraná, foi observado uma diferença no comportamento das estações, enquanto a estação PRMA mostrou uma variação anual de 2 (mm/ano), as estações PRGU e UFPR, mostraram uma variação anual de -3 (mm/ano) e -1 (mm/ano), respectivamente. Uma análise mais detalhada acerca do comportamento regional das altitudes elipsoidais requer necessariamente o emprego de um número maior de estações com longa série de dados GNSS.

Os cálculos das correlações entre as altitudes elipsoidais e ortométricas mostraram que os modelos do geopotencial gerados pelo CSR Release-05, GFZ Release-05 e JPL Release-05 desenvolvidos até o grau 60, tiveram melhor correlação com os dados das altitudes elipsoidais quando comparados com os modelos desenvolvidos pelos mesmos centros de pesquisa, porém para os graus maiores (90 e 96), o que indica uma tendência de potencialidade maior para os MGGs desenvolvidos até o grau 60. Esse fato pode ser explicado devido ao aumento do erro de comissão nos modelos a partir do grau 60 e a menor contribuição do efeito hidrológico justamente neste grau de desenvolvimento.

Como recomendações para este trabalho:

- a) realizar uma análise mais detalhada com relação a estação RECF, que apresentou diferenças significativas entre as altitudes ortométricas determinadas pelos modelos globais do geopotencial e a altitude ortométrica que consta no relatório da estação;
- b) realizar experimentos com mais estações da RBMC;
- c) ampliar o período das séries temporais das altitudes;
- d) determinar as variações sazonais das séries temporais;
- e) devido às variações sazonais que ocorrem nas estações, determinar correlações não-lineares;
- f) efetuar estudos relacionados com a influência do regime hidrológico nas séries temporais de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA FILHO, F. G. V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE**: aplicação na bacia Amazônica. 2009. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2009.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; BOUCHER, C. Accuracy assessment of the ITRF datum definition. In: XU, P.; LIU, J.; DERMANIS, A.; **International Association of Geodesy Symposia**. v. 132. Wuhan, China: Springer, 2008. p. 101–110.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. **Journal of Geodesy**, v. 85, n. 8, p. 457–473, 2011.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2016.
- ALVES COSTA, S. M. **Integração da Rede Geodésica Brasileira aos sistemas de referência terrestre**. 1999. 170 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 1999.
- ALVES COSTA, S. M.; LIMA, M. A. A.; MOURA JUNIOR, N. J.; ABREU, M. A.; DA SILVA, A. L.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. **Simpósio...** Recife:2008.
- ARDALAN, A. A.; KARIMI, R.; POUTANEN, M. A bias-free geodetic boundary value problem approach to height datum unification. **Journal of Geodesy**, v. 84, n. 2, p. 123–134, 2010.
- BALMINO, G. Gravity Field Recovery From GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods. **Space Science Reviews**, v. 108, p. 47–54, 2002.
- BARTHELMES, F. **Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models**. Potsdam: German Research Centre for Geosciences, Revised Edition, 2013. p. 36, Scientific Technical Report STR09/02.
- BETTADPUR, S. **GRACE 327-720 (CSR-GR-03-02) Gravity Recovery and Climate Experiment**. Austin, Texas: 2012. p. 77. GRACE Product Specification Document.
- BEVIS, M.; BROWN, A. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. **Journal of Geodesy**, v. 88, n. 3, p. 283–311, 2014.
- BOMFORD, G. **Geodesy**. 3th ed. Oxford: Oxford University Press, 1971.

BURŠA, M.; KENYON, S.; KOUBA, J.; ŠÍMA, Z.; VATRT, V.; VÍTEK, V.; VOJTÍSKOVÁ, M. The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system. **J Geodesy**, v. 81, p. 103–110, 2006.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; JUNIOR, J. G.; KRUEGER, C. P. Sistematização das etapas para determinação posicional em SIRGAS2000 com base nas coordenadas ITRF (IGB08) obtidas por serviços PPP online. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n.1, p. 43–58, 2015.

CAZENAVE, A.; CHEN, J. Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 298, n. 3–4, p. 263–274, 2010.

CHAMBERS, D. P.; BONIN, J. A. Evaluation of Release-05 GRACE time-variable gravity coefficients over the ocean. **Ocean Science**. v. 8, n. 5, p. 859-868. 2012.

CHEN, P. Y.; POPOVICH, P. M. Correlation: parametric and nonparametric measures. London: Sage, 2002. 95p.

CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. **Introduction to Modern Business Statistics**. New York: John Wiley, 1982.

CSR: **Missions**. Disponível em: <<https://www.csr.utexas.edu/missions/>>. Acessado em: 28/06/2017a.

CSR: **Missions – Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) – Science Data Products**. Disponível em: <<http://www2.csr.utexas.edu/grace/asdp.html>>. Acessado em: 12/02/2017b.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e altimetria por satélites visando a integração da Rede Vertical Brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 2, p. 140–153, 2005.

DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à análise temporal do Datum vertical brasileiro**. 2005 188 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DA SILVA, L. M. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. 2017, 272 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DE FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. Modelagem do potencial anômalo no datum Vertical Brasileiro Visando sua nova definição. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 395–419, 2007.

DE FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DE CARVALHO, J. L. B.; DA SILVA, L. F. Analysis of the Geopotential Anomalous Component at Brazilian Vertical Datum Region Based on the Imarui Lagoon System. In: MERTIKAS, S. P. **Gravity, Geoid and Earth Observation**. v. 135. Crete, Grécia: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 321–327.

DE FREITAS, S. R. C. SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. **Revista Cartográfica**, v. 91, p. 75–92, 2015.

DER WAL, W. V.; RANGELOVA, E.; SIDERIS, M. G.; WU, P. Secular Geoid Rate from GRACE for Vertical Datum Modernization. In: MERTIKAS, S. P. **Gravity, Geoid and Earth Observation**. v. 135. Crete, Grécia: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 611-617.

DENNIS, D. M. C.; GÉRARD, P. **IERS Conventions (2003)**. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. p. 127, IERS Technical Note No. 32.

DREWES, H. The changing objectives in geodetic research. **ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement**. v. 131, n. 5, p. 1-8, 2006.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; DE FREITAS, S. R. C. Scientific foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: DREWES, H.; DODSON, A. L.; SOUTO FORTES, L. P.; SÁNCHEZ, L.; SANDOVAL, P. **Vertical Reference Systems**. v. 124. Cartagena, Colombia: Springer Berlin Heidelberg, 2002. p. 297-301.

EKMAN, M. Impacts of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity. *Bull. Géod.* 63, p. 281-296, 1989.

EGU: **awards-medals – List of awards-medals – Division Medals – Vening Meinesz Medal Geodesy – Awardees – Srinivas Bettadpur**. Disponível em: <<http://www.egu.eu/awards-medals/vening-meinesz/2016/srinivas-bettadpur/>> Acessado em: 31/08/2016.

FEATHERSTONE, W. E. Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia. **Journal of Geospatial Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1–19, 2002.

FORTES, L. P. S. **SIRGAS: O Sistema de Referência Para o Novo Milênio**. Seminário sobre Referencial Geocêntrico no Brasil. 2000.

FLURY, J.; RUMMEL, R. Future Satellite Gravimetry for Geodesy. *Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU. Earth, Moon, and Planets*, 94: p.13-29, 2005.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. 2.ed. Curitiba: UFPR. 302 p. 2012.

GERLACH, C.; RUMMEL, R. Global height system unification with GOCE: a simulation study on the indirect bias term in the GBVP approach. **Journal of Geodesy**, v. 87, n. 1, p. 57–67, 2012.

GUNTER, R.; RIES, J.; BETTADPUR, S.; TAPLEY, B. A simulation of the errors of omission and commission for GRACE RL01 gravity fields. **Journal of Geodesy**, v. 80, n. 7, p. 341–351, 2006.

HAN, S. C.; RAY, R. D.; LUTHCKE, S. B. One centimeter-level observations of diurnal ocean tides from global monthly mean time-variable gravity fields. **J Geod**, v. 84, p. 715–729, 2010.

HAO, M.; FREYMUELLER, J. T.; WANG, Q.; CUI, D.; QIN, S. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 437, p. 1–8, 2016.

HECK, B.; RUMMEL, R. Strategies for solving the vertical datum problem using terrestrial and satellite geodetic data. In: SÜNKEL, H.; BAKER, T. **Sea Surface Topography and the Geoid**. vol. 104. New York, United States: Springer-Verlag, 1990. p. 116-128.

IAG. **Description of the Global Geodetic Reference Frame (GGRF) by the IAG**. 2016. IAG Position Papers.

IBGE. **Geociências – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) – RBMC-IP – Localização das Estações**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ntrip/mapa_localizacao.shtm>. Acesso em 24/06/2017a.

IBGE: **Geociências – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) – Centro de Processamento**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas_proc/introducao.shtm>. Acessado em: 05/02/2017b.

IBGE: **Geociências – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) – Centro de Combinação**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas_comb/introducao.shtm>. Acessado em: 05/02/2017c.

IBGE: **Geociências – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) – Centro de Combinação - Resultados**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas_comb/resultados.shtm>. Acessado em: 13/02/2017d.

IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: janeiro 2017**. Coordenação de Geodésia – Diretoria de Geociências, 2017. Manual do Usuário.

IERS: **Organization – about IERS – Objectives**. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>>. Acessado em 23/06/2017.

IHDE, J.; SÁNCHEZ, L. A unified global height reference system as a basis for IGGOS. **Journal of Geodynamics**, v. 40, n. 4–5, p. 400–413, 2005.

IUGG. Disponível em: <<http://www.iugg.org/>>. Acessado em 01/08/2016.

JAMUR, K. P. **Estimativa da Resolução de Modelos Geoidais Globais Obtidos de Missões Satelitais e Gravimétricos Regionais para o Estado do Paraná com Base em Observações GPS sobre RNs.2007**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

JARAMILLO, A. G. S.; DE FREITAS, S. R. C.; CAMBOIM, S. P. Integração das Redes Verticais Sul-Americanas: Inventário em Vistos e Termos de Referência do SIRGAS/IAG/GGOS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 6 p. 1279–1295, 2015.

KAULA, W. Tests and combinations of satellite determinations of the gravity field with gravimetry, *J Geophys Res*, 71, 5303-5314, 1966.

KOTSAKIS, C.; KATSAMBALOS, K.; AMPATZIDIS, D. Estimation of the zero-height geopotential level W_0^{LVD} in a local vertical datum from inversion of co-located GPS, leveling and geoid heights: a case study in the Hellenic islands. **Journal of Geodesy**, v. 86, n. 6, p. 423–439, 2011.

LOBIANCO, M. C. B. **Análise dos dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS 2006 a 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. p. 424. Relatório Técnico.

LUZ, R. T. **Estratégias para modernização da componente vertical do sistema geodésico brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 2008. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MÄKINEN, J.; IHDE, J. The permanent tide in height systems. In: SIDERIS, M. G., *Observing our Changing Earth*, International Association of Geodesy Symposia 133, p. 81- 87, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

MCCARTHY, D. D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003)**. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. p. 127, IERS Technical Note No. 32.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: UNESP. 476 p. 2007.

NICACIO JUNIOR, E. L. **Single Point GEM Generator**. 2016. Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/spgg>>

NICACIO JUNIOR, E. L., DALAZOANA, R. Análises de extractos de Modelos Globales de Geopotencial Generados punto-a-punto a partir de una Aplicación Standalone. In: Simposio SIRGAS 2016, Quito, Equador. Apresentação oral. Quito: Instituto Geografico Militar, 2016.

RANGELOVA, E. DER WAL, W. V.; SIDERIS, M. G.; WU, P. Numerical models of the rates of change of the geoid and orthometric heights over Canada. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. **Dynamic Planet**. v. 130. Cairns, Australia: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 563–570.

RANGELOVA, E.; DER WAL, W. V.; SIDERIS, M. G. How Significant is the Dynamic Component of the North American Vertical Datum? **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, p. 281–289, 2012.

RAPP, R. H. Analytical and numerical differences between two methods for the combination of gravimetric and satellite data. **Bollettino di Geofisica Teorica**, v. 9, n. 41-42, p. 108-118, 1967.

RIGUZZI, F.; CRESPI, M.; CUFFARO, M.; DOGLIONI, C.; GIANNONE, F. A model of plate motions. In: SANSÒ, F.; Gil, A. J. **Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles**. v. 131. Jaén, Espanha: Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 200-208.

RUMMEL, R.; BALMINO, G.; JOHANNESSEN, J.; VISSER, P.; WOODWORTH, P. Dedicated gravity field missions—principles and aims. **Journal of Geodynamics**, v. 33, p. 3–20, 2002.

SÁNCHEZ, L. Definition and Realisation of the SIRGAS Vertical Reference System within a Globally Unified Height System. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. **Dynamic Planet: Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic**. v. 130. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007. v. 130p. 638–645.

SÁNCHEZ, L. Sistemas de Referencia Vertical. In: **Taller Sistema Vertical de Referencia SIRGAS (SVRS)**. Curitiba, Brasil. 18 a 22 de maio de 2015.

SANCHEZ, L. SIRGAS Regional Network Associate Analysis Center Technical Report 2015. In: JEAN, Y., DACH, R. **International GNSS Service Technical Report 2015**. Bern, Suíça: 2016. p. 111-121.

SÁNCHEZ, J. L. C.; DE FREITAS, S. R. C. Estudo do Sistema Vertical de Referência do Equador no Contexto da Unificação do Datum Vertical. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, p. 248–264, 2016.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal Deformation and Surface Kinematics after the 2010 Earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, p 1-23, 2016.

SATIRAPOD, C.; TRISIRISATAYAWONG, I.; FLEITOUT, L.; GARAUD, J. D.; SIMONS, W. J. F. Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 8, p. 1565–1571, 2013.

SCHMIDT, R. FLECHTNER, F.; MEYER, U.; REIGBER, C.; BARTHELMES, F.; FORSTE, C.; STUBENVOLL, R.; KONIG, R.; NEUMAYER, K. H.; SHOW LESS, S.

Z. Static and Time-Variable Gravity from GRACE Mission Data. In: FLURY, J. RUMMEL, R.; REIGBER, C.; ROTHACHER, M.; BOEDECKER, G.; SCHREIBER, U. **Observation of the Earth System from Space**. Munich and Potsdam: Springer, 2006. p. 115-129.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd ed. New-York: Walter de Gruyter. 589p. 2003.

SIRGAS: **Presentación**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=64>>. Acessado em: 15/08/2016a.

SIRGAS: **Grupos de trabajo – SIRGAS-GTIII (Datum Vertical) – actividades en desarrollo**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=75>>. Acessado em: 23/08/2016c.

SIRGAS: **Grupos de trabajo – SIRGAS-GTIII (Datum Vertical) – Datum Vertical**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=60>>. Acessado em: 22/06/2017a.

SIRGAS: **Grupos de trabajo**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=57>>. Acessado em: 23/06/2017b.

SIRGAS: **Realizaciones**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=53>>. Acessado em: 05/02/2017c.

SUN, T.; FERREIRA, V. G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S. A. Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. **Water**, v. 8, n. 5, p. 213, 2016.

TESMER, V.; STEIGENBERG, P.; VAN DAME, T.; MAYER-GURR, T. Vertical Deformations from Homogeneously Processed GRACE and Global GPS Long-Term Series. **Journal of Geodesy**, v. 85, p. 291–310, 2011.

TIERRA, A.; DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. Using an artificial neural network to improve the transformation of coordinates between classical geodetic reference frames. **Computers and Geosciences**, v. 34, n. 3, p. 181–189, 2007.

TIWARI, V. M.; SRINIVAS, N.; SINGH, B. Hydrological changes and vertical crustal deformation in south India: Inference from GRACE, GPS and absolute gravity data. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 231, p. 74–80, 2014.

TORGE, W.; MULLER, T. **Geodesy**. 4th. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2011.

UNITED NATIONS. **A/RES/69/266**: A global geodetic Reference frame for sustainable development. New York, 2015.

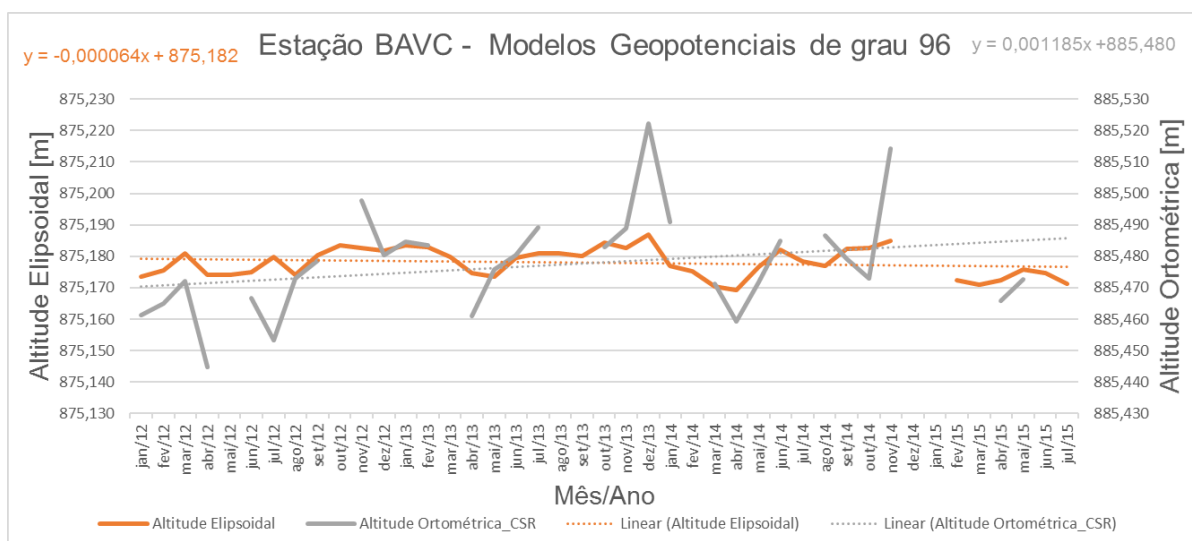
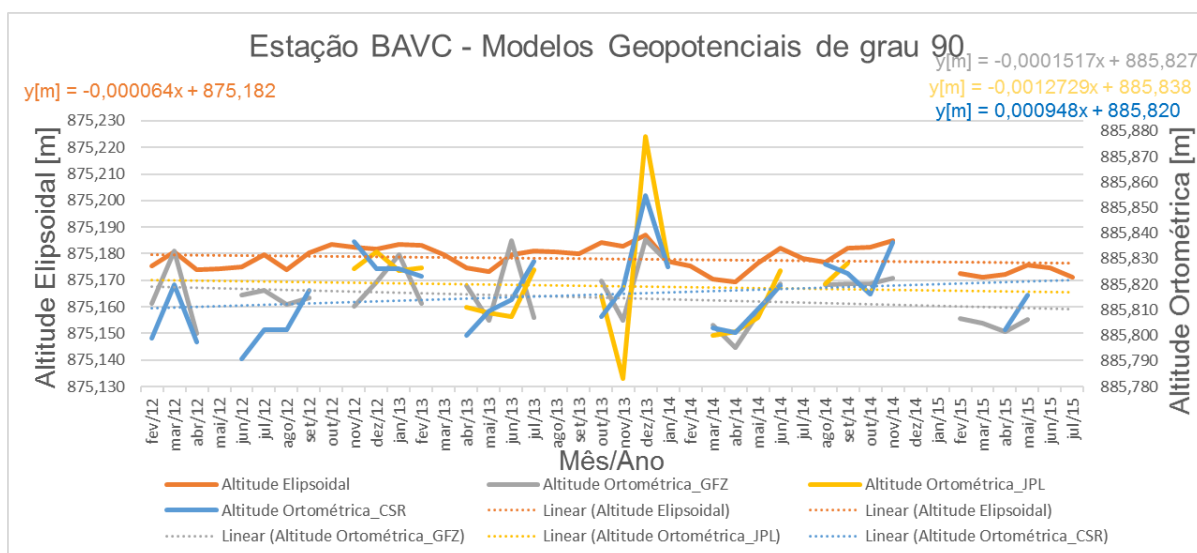
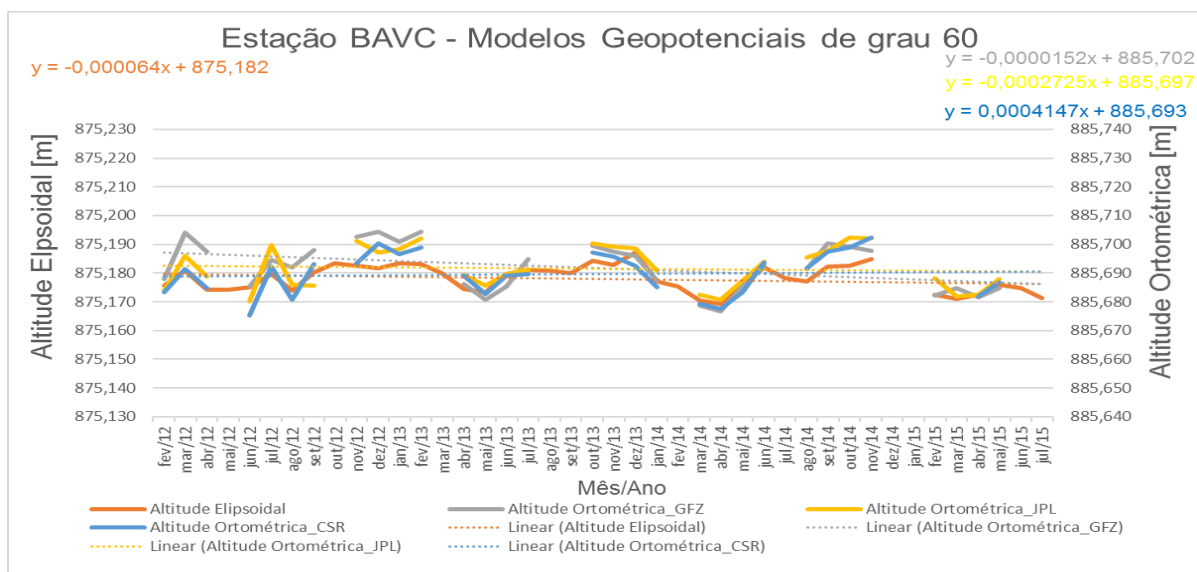
VAN DAM, T.; WAHR, J.; LAVALLÉE, D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 112, n. 3, 2007.

WAHR, J.; SWENSON, S.; VELICOGNA, I. Accuracy of GRACE mass estimates. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.

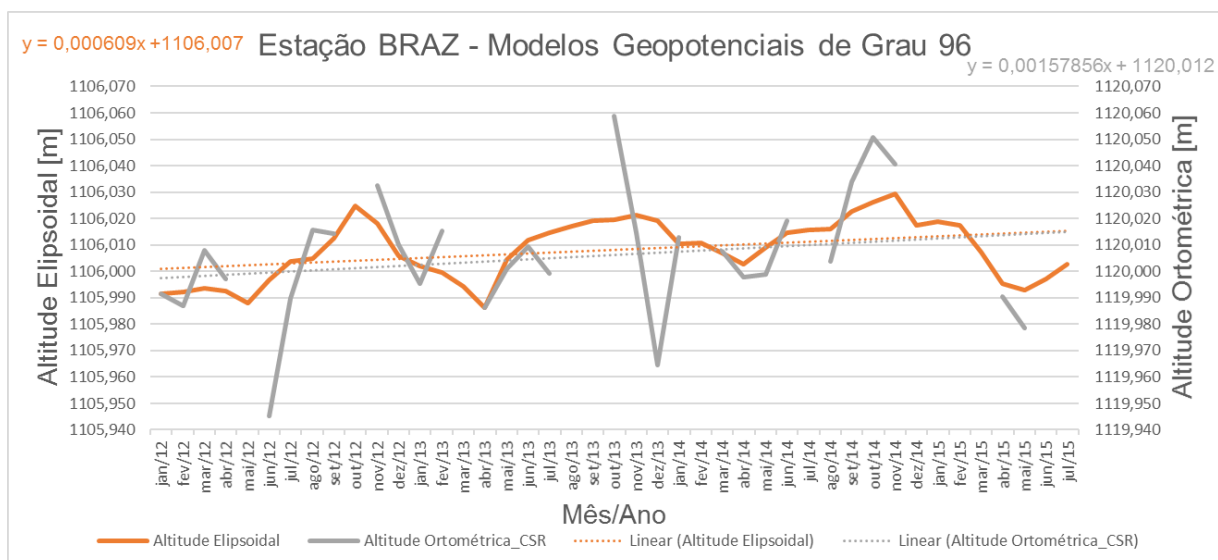
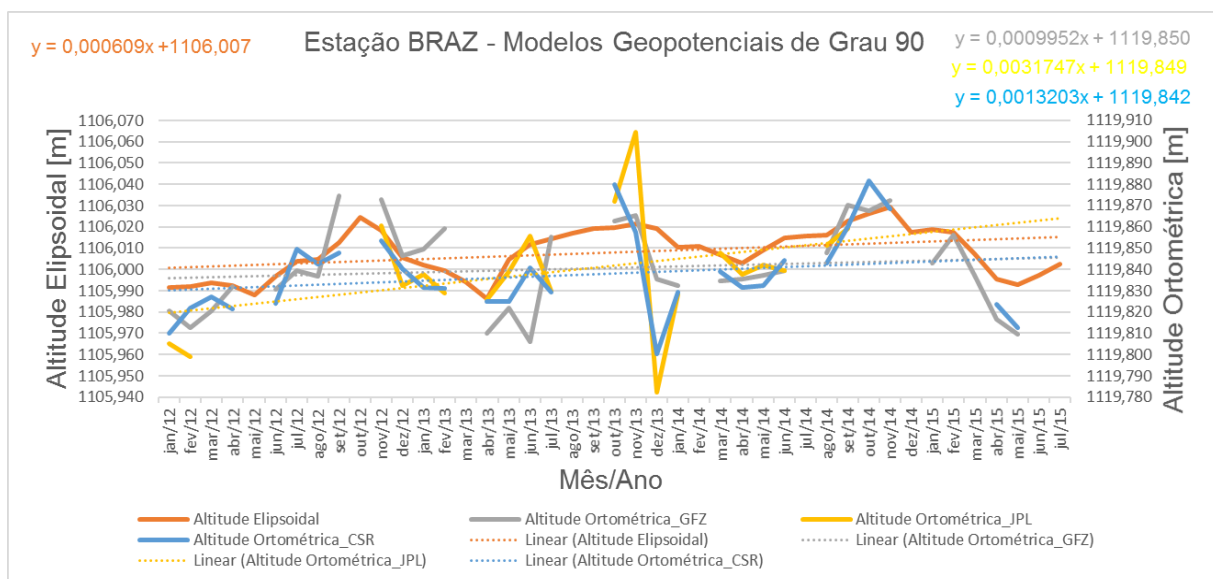
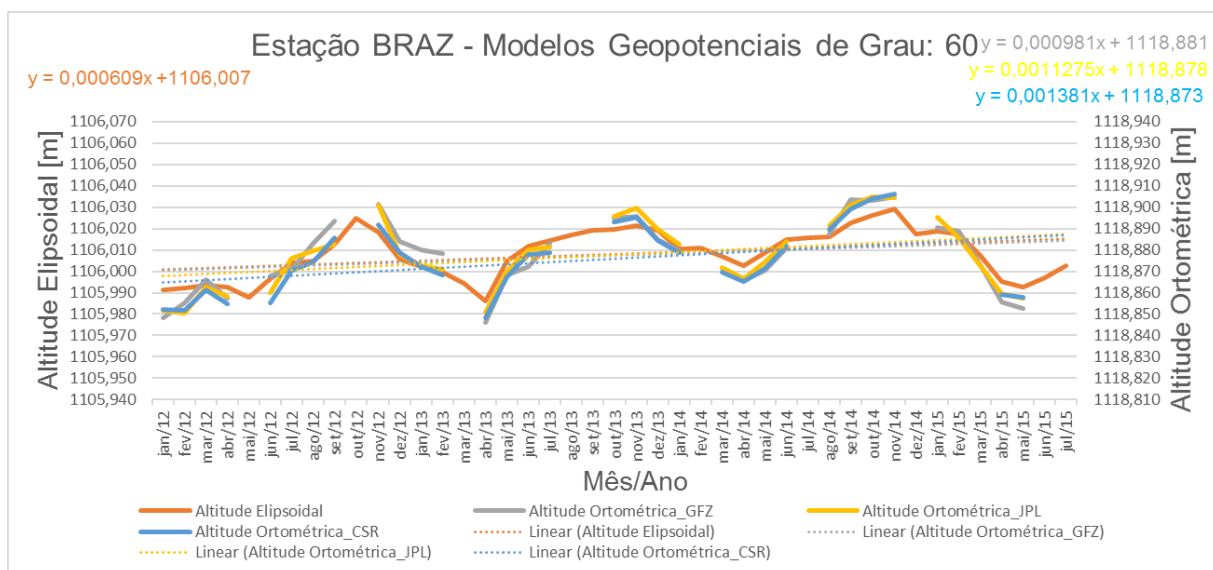
APÊNDICE

APÊNDICE 1 – Gráficos de comparação entre Altitudes Elipsoidal e Ortométricas

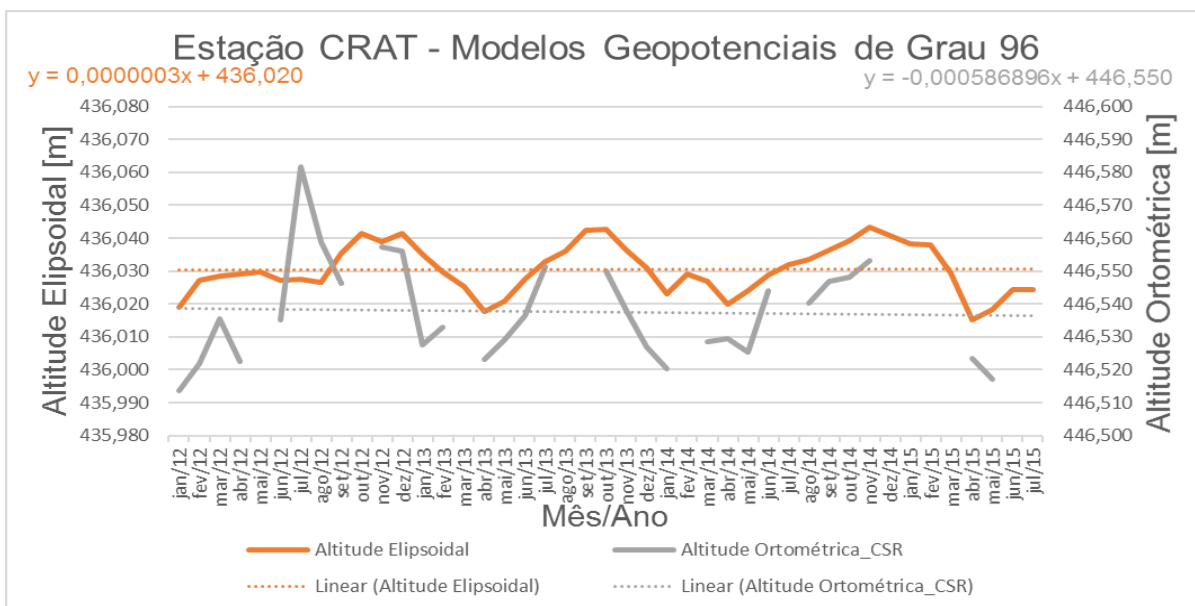
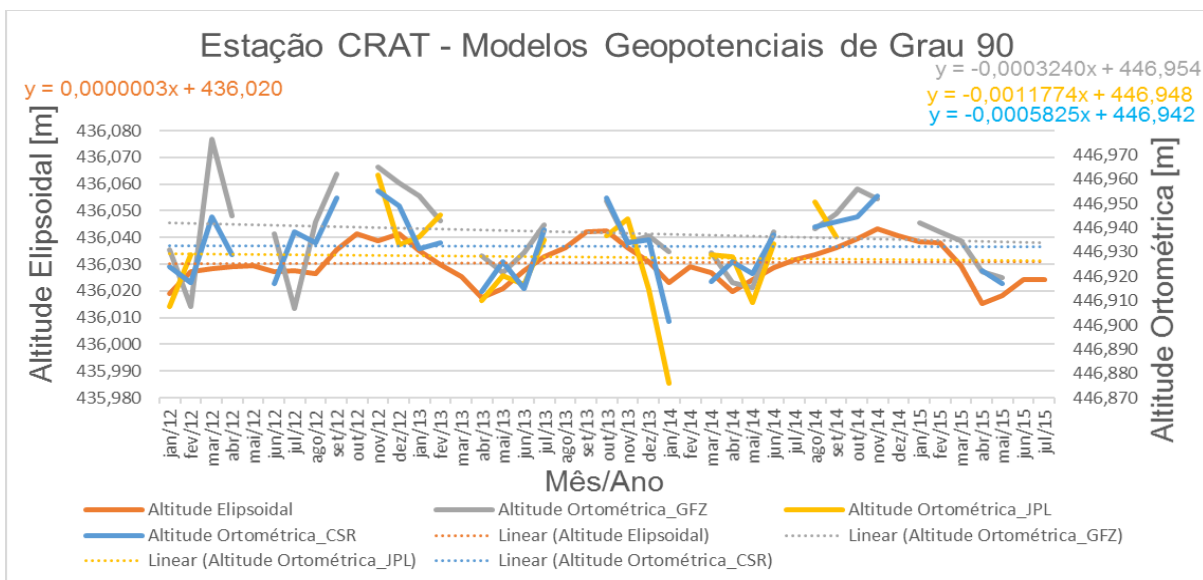
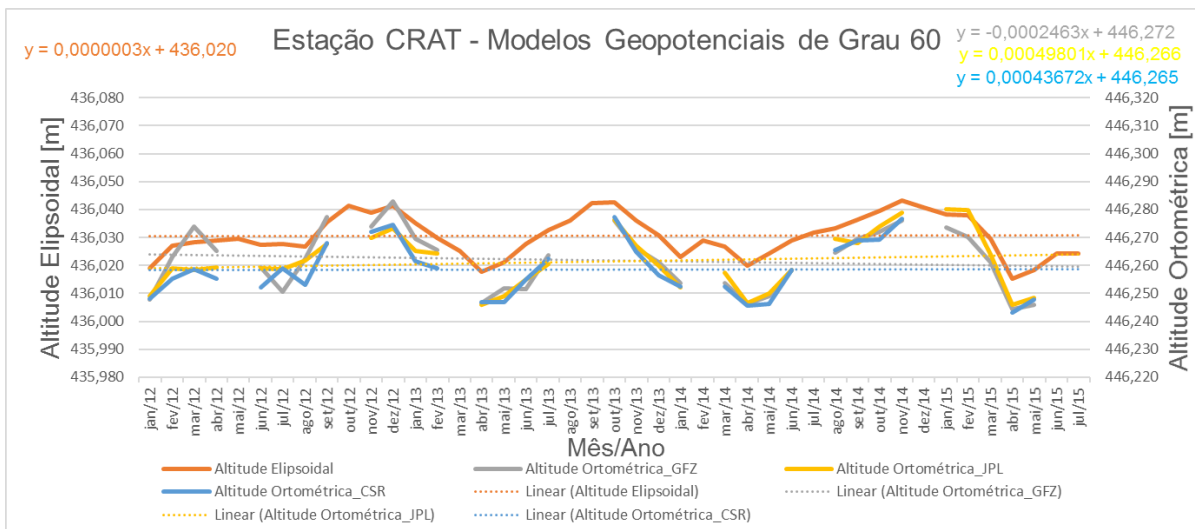
Estação BAVC



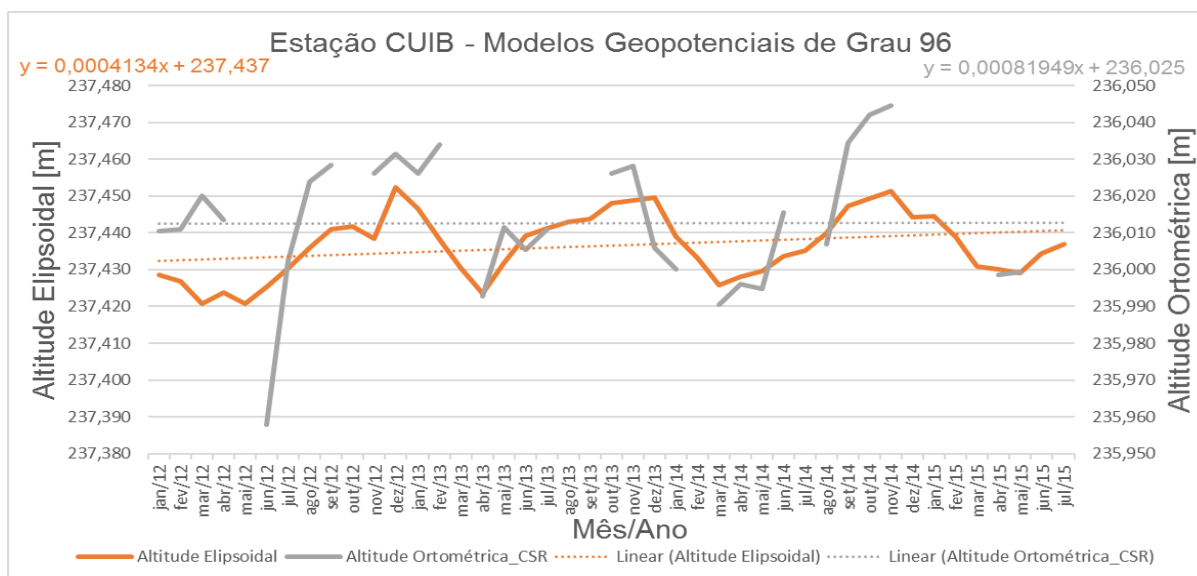
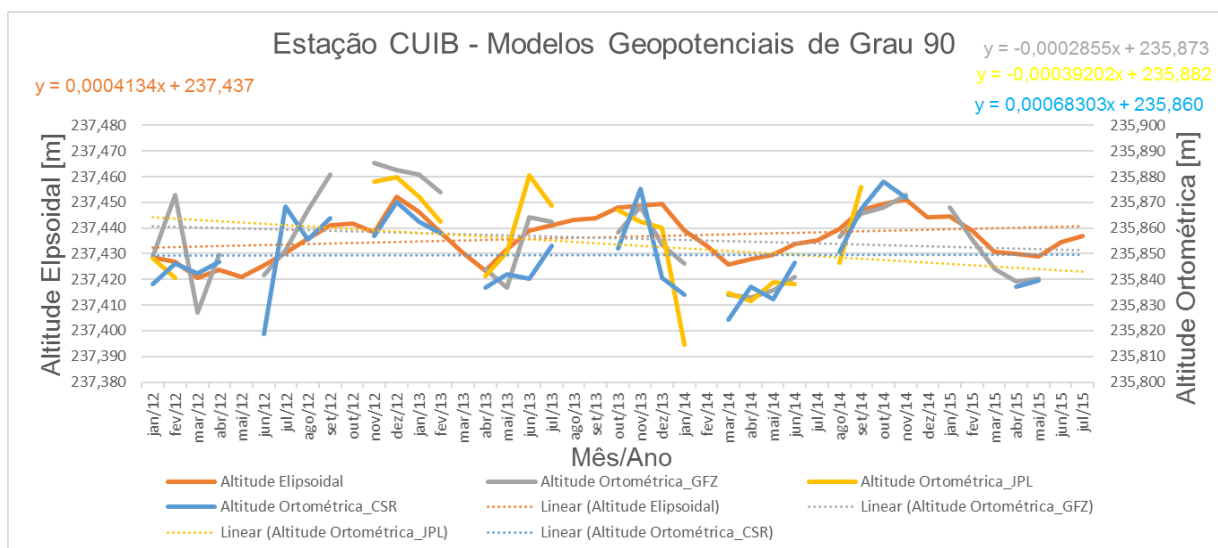
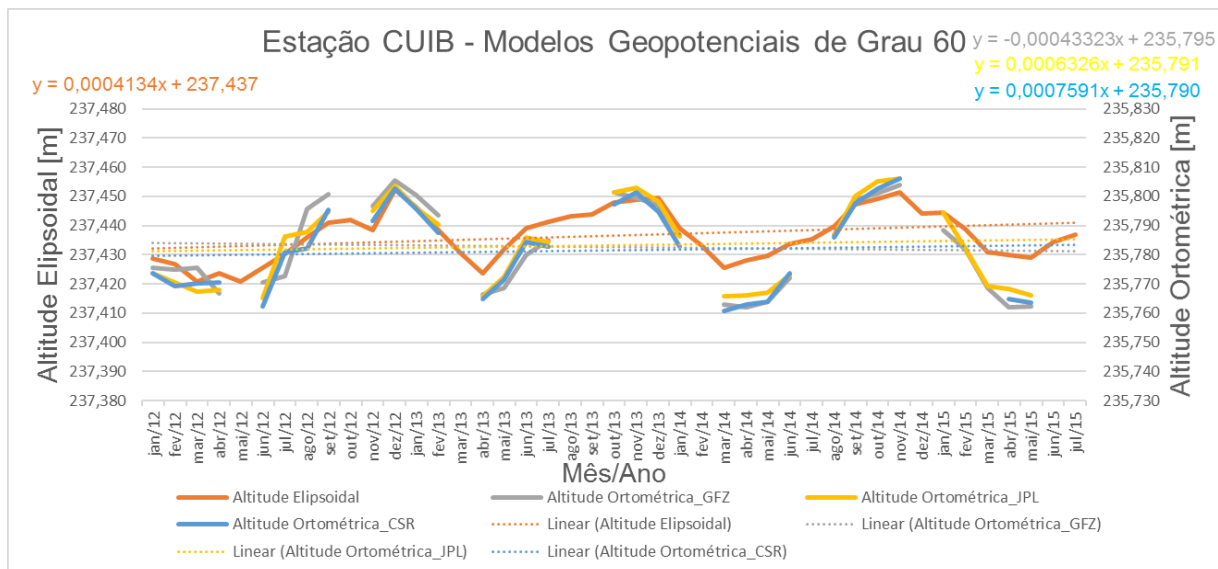
Estação BRAZ



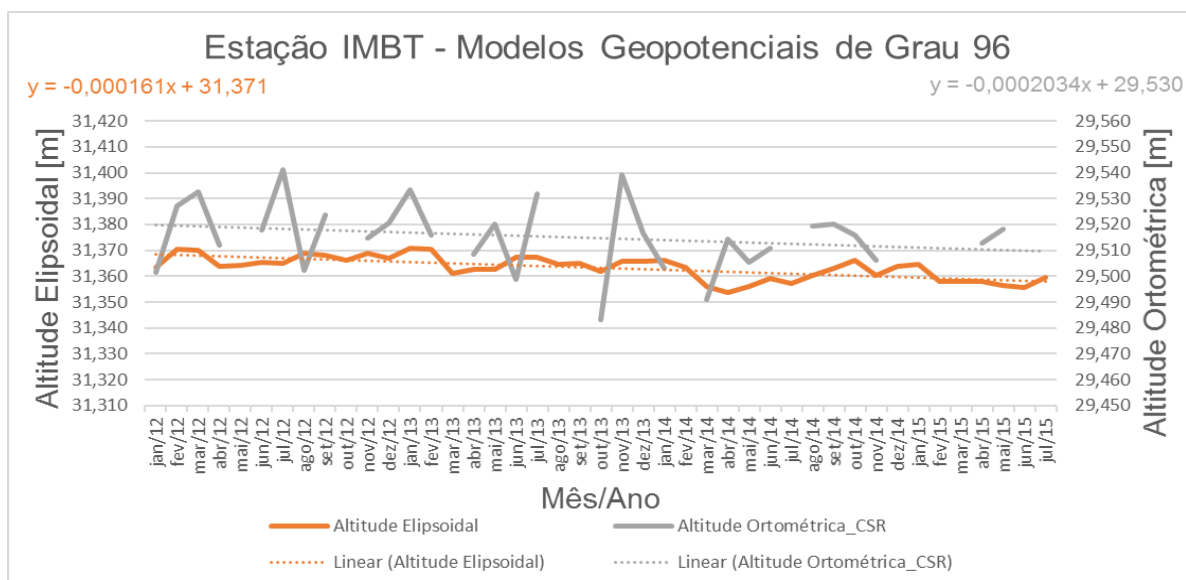
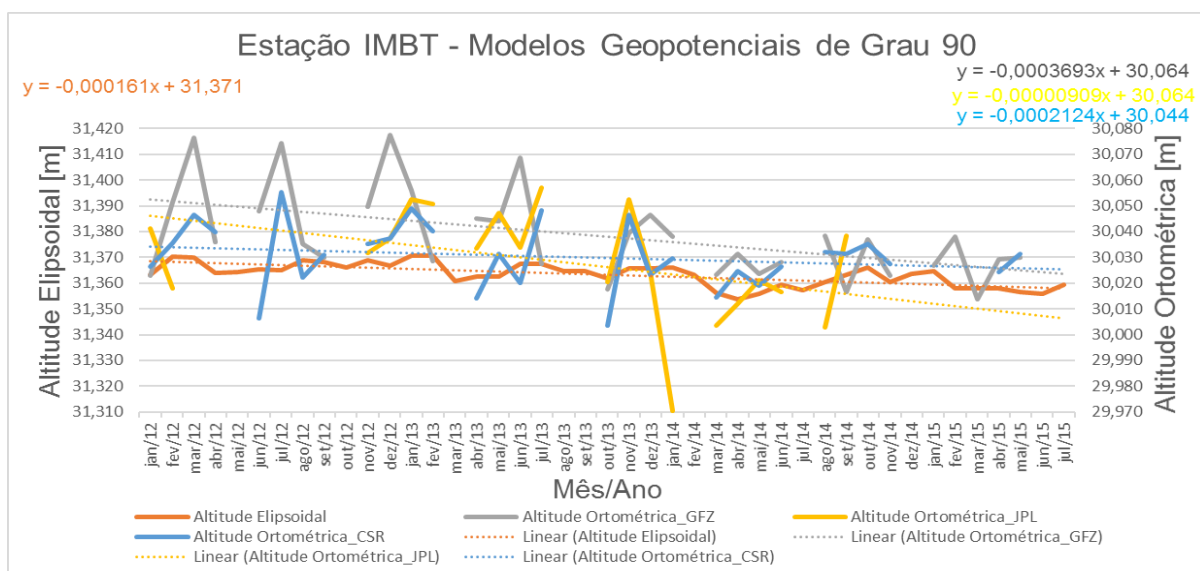
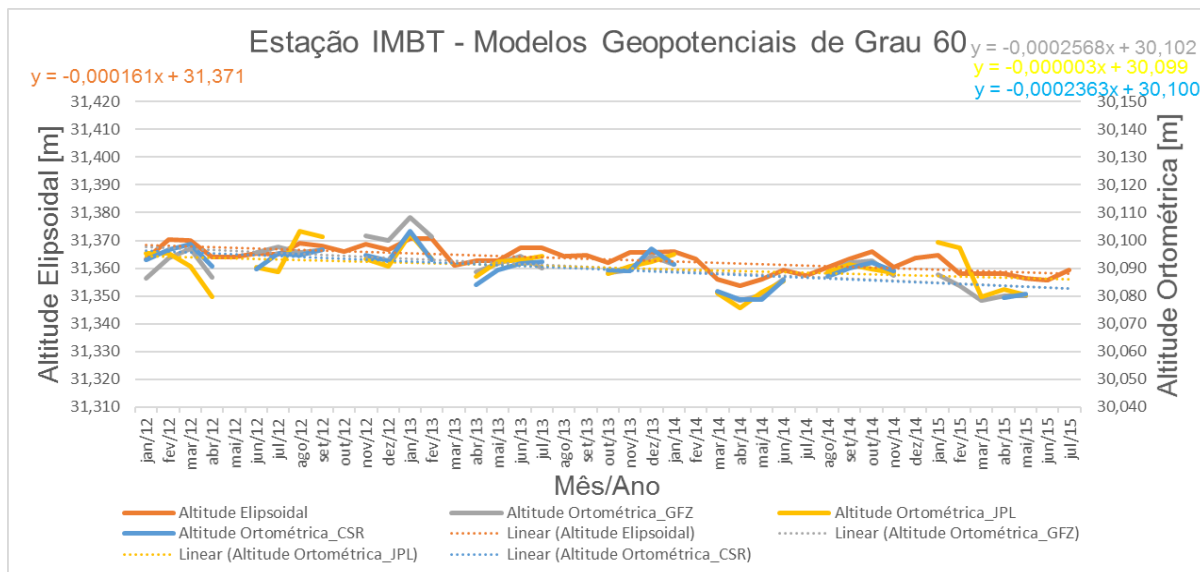
Estação CRAT



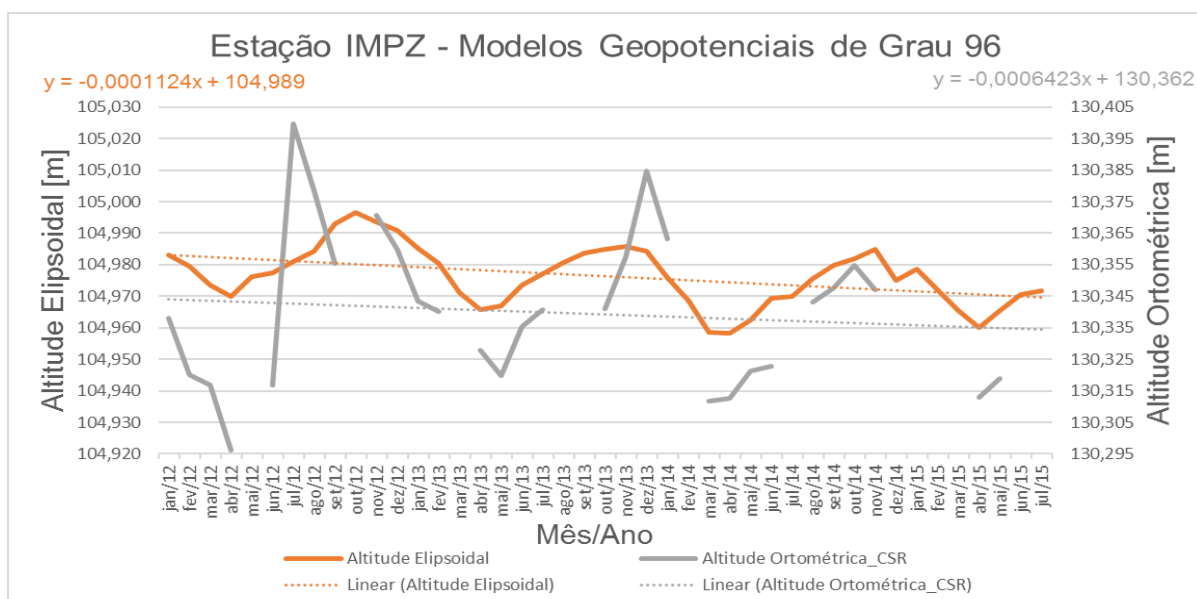
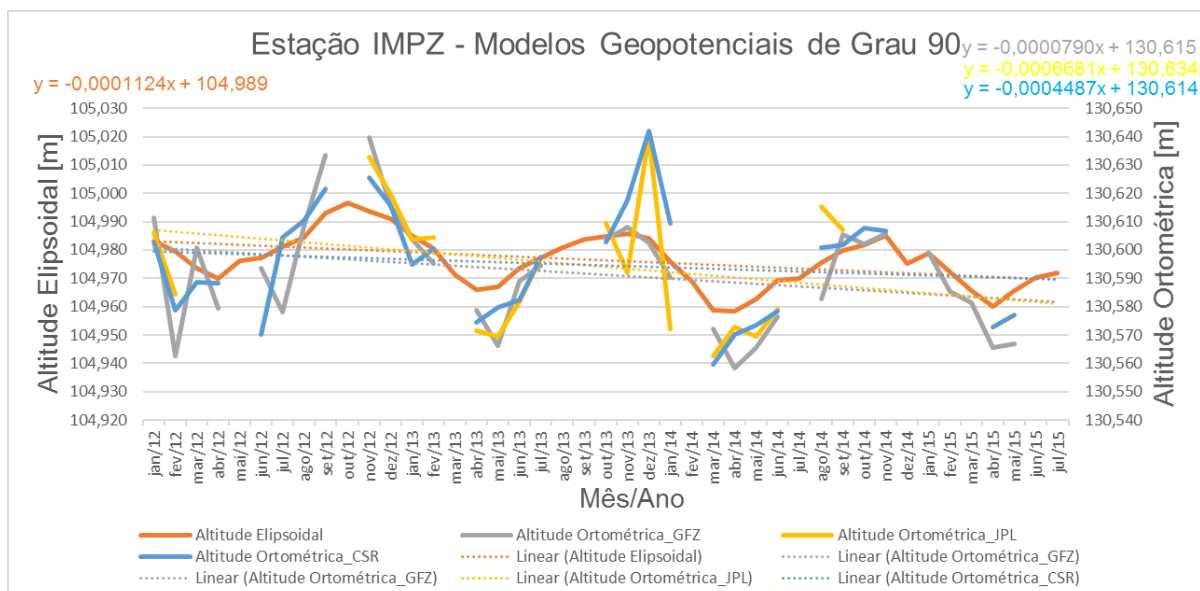
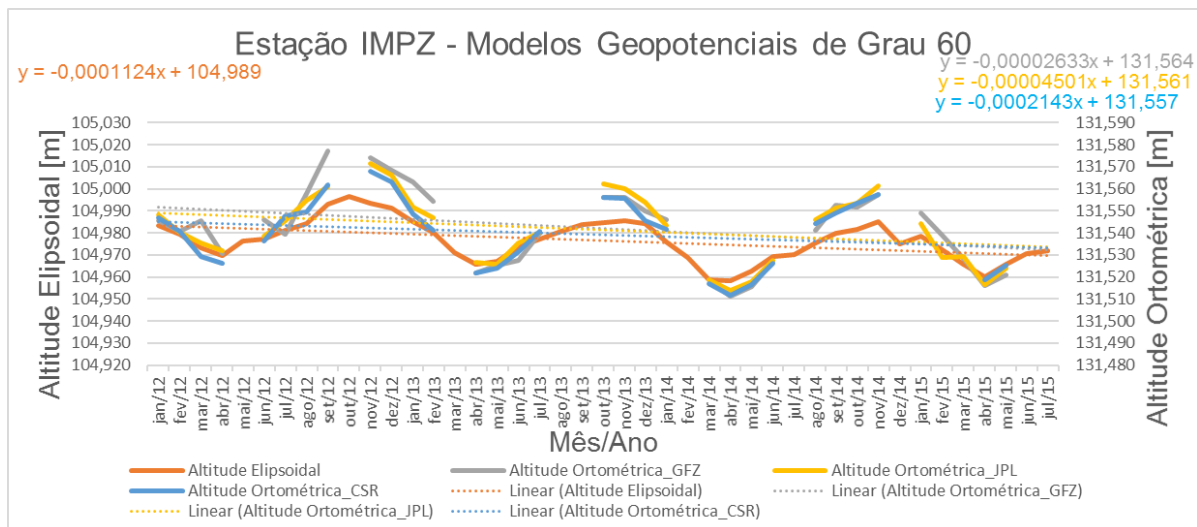
Estação CUIB



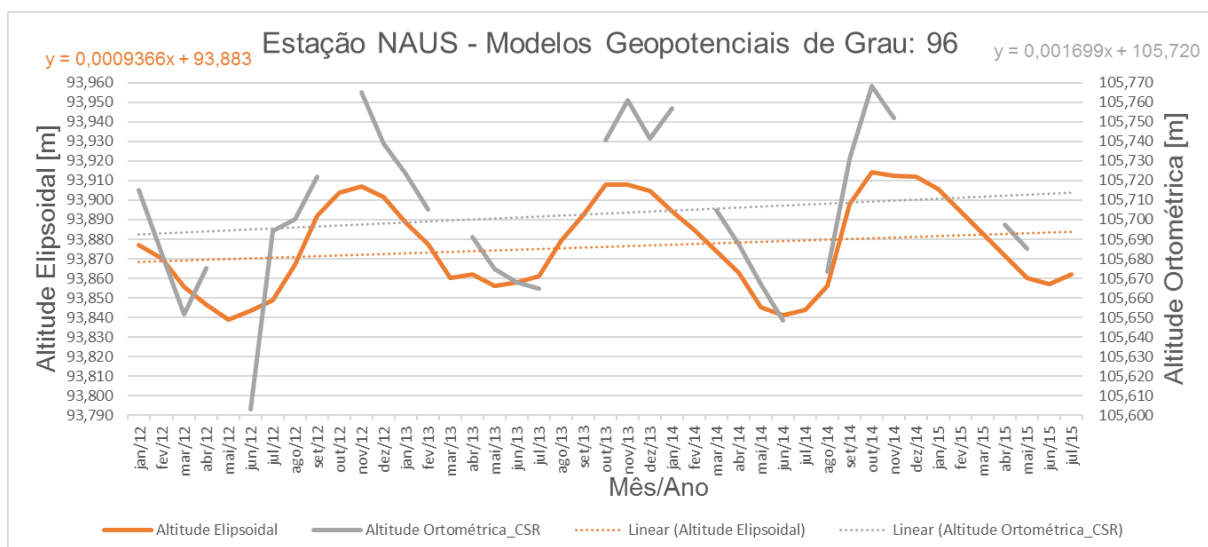
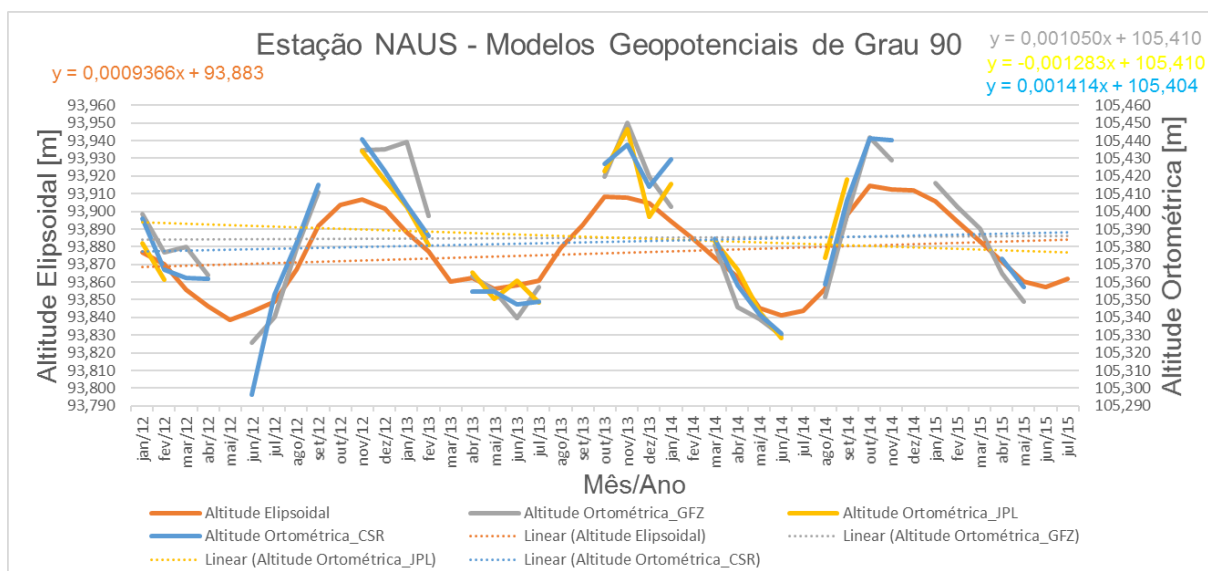
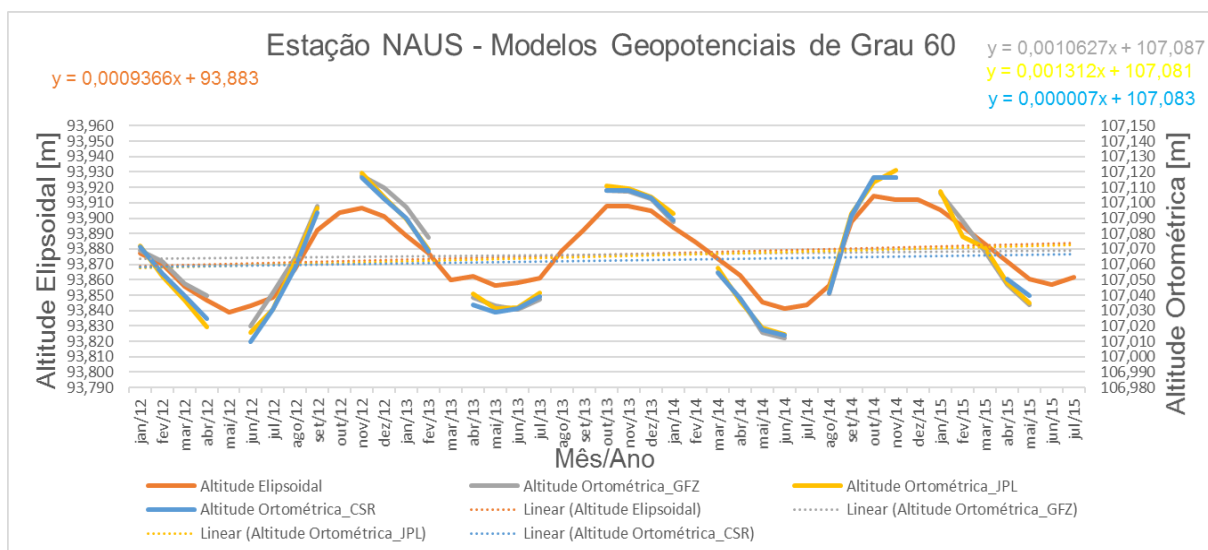
Estação IMBT



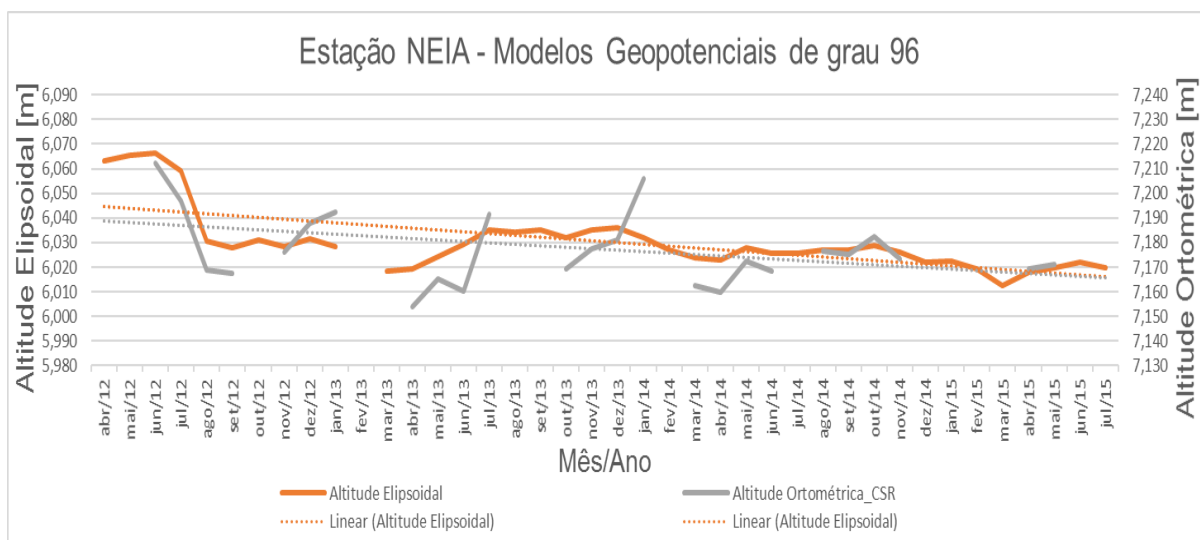
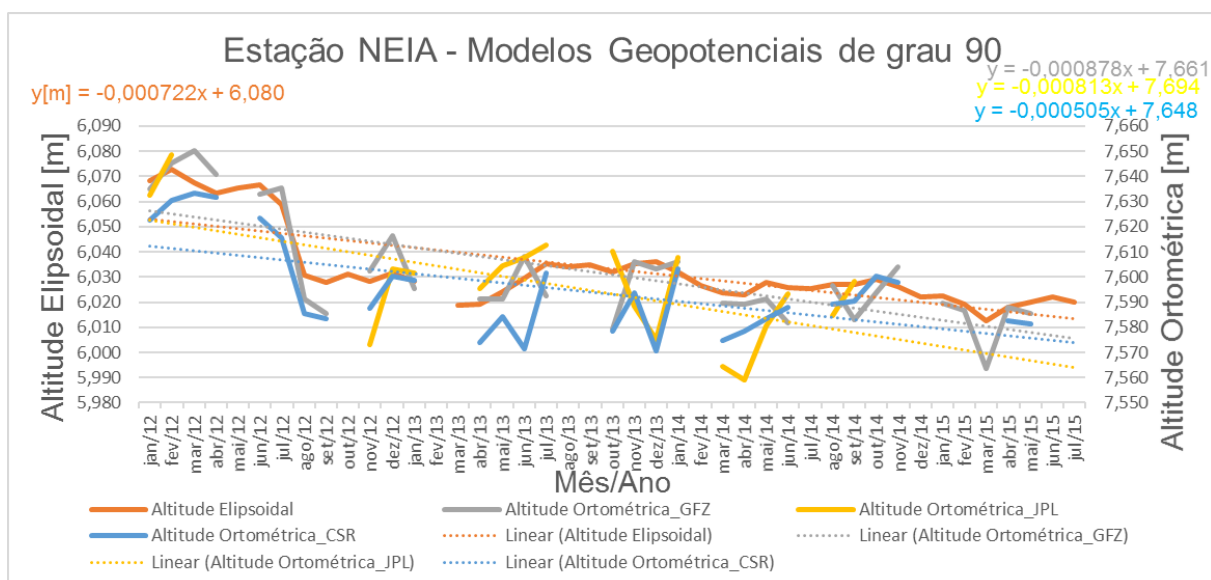
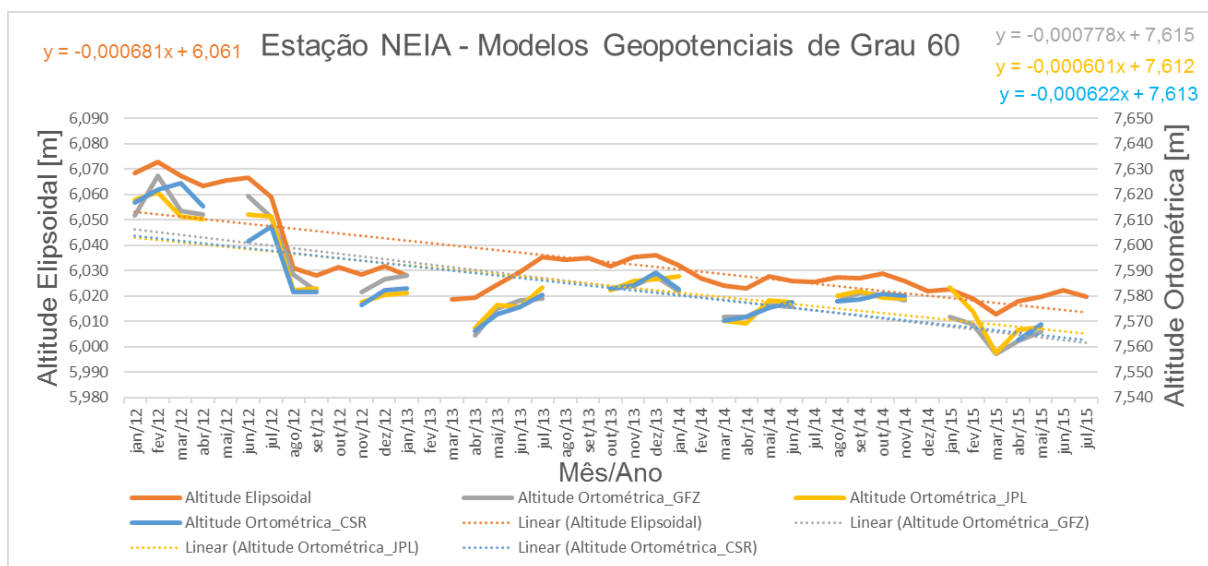
Estação IMPZ



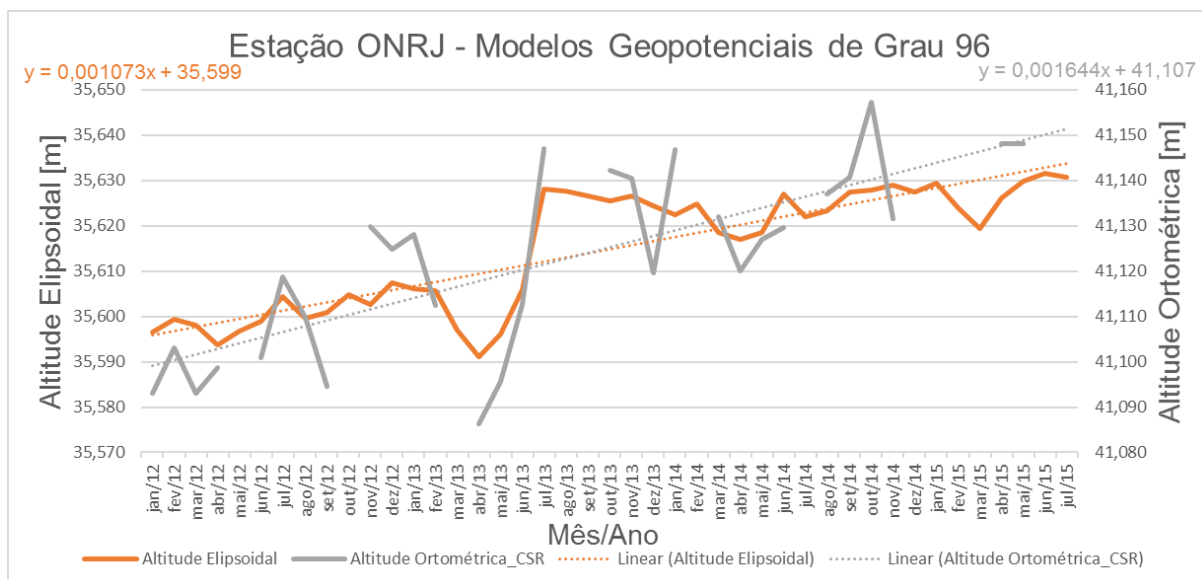
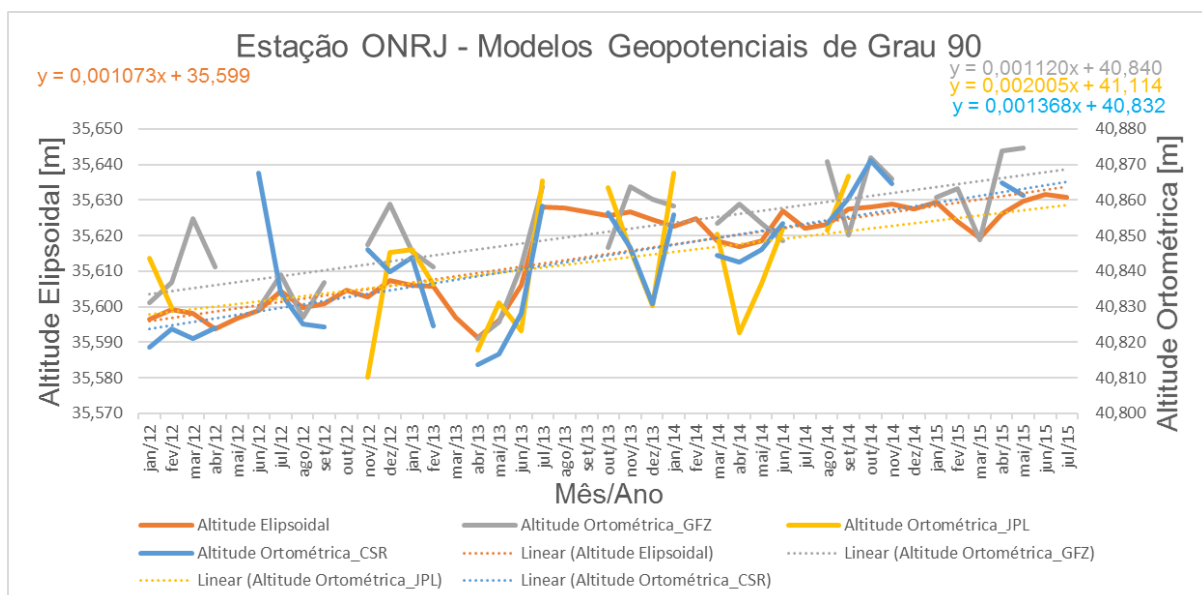
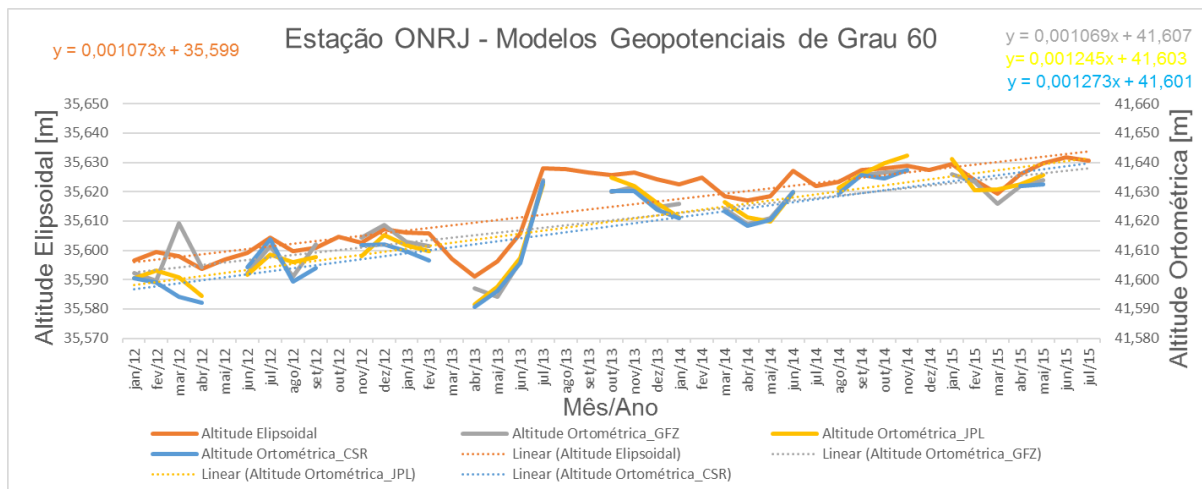
Estação NAUS



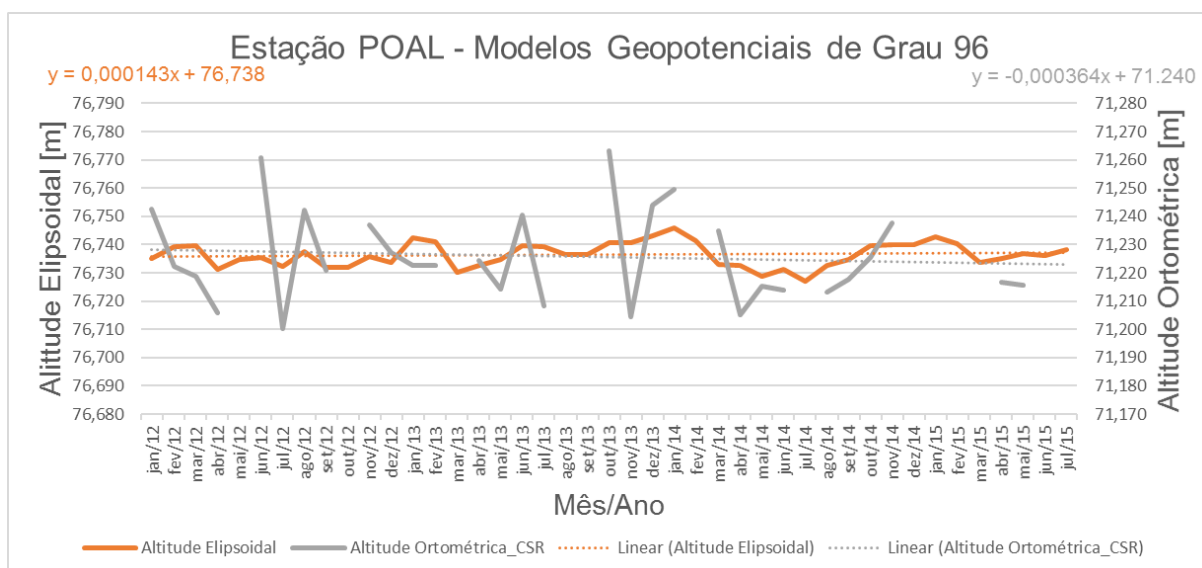
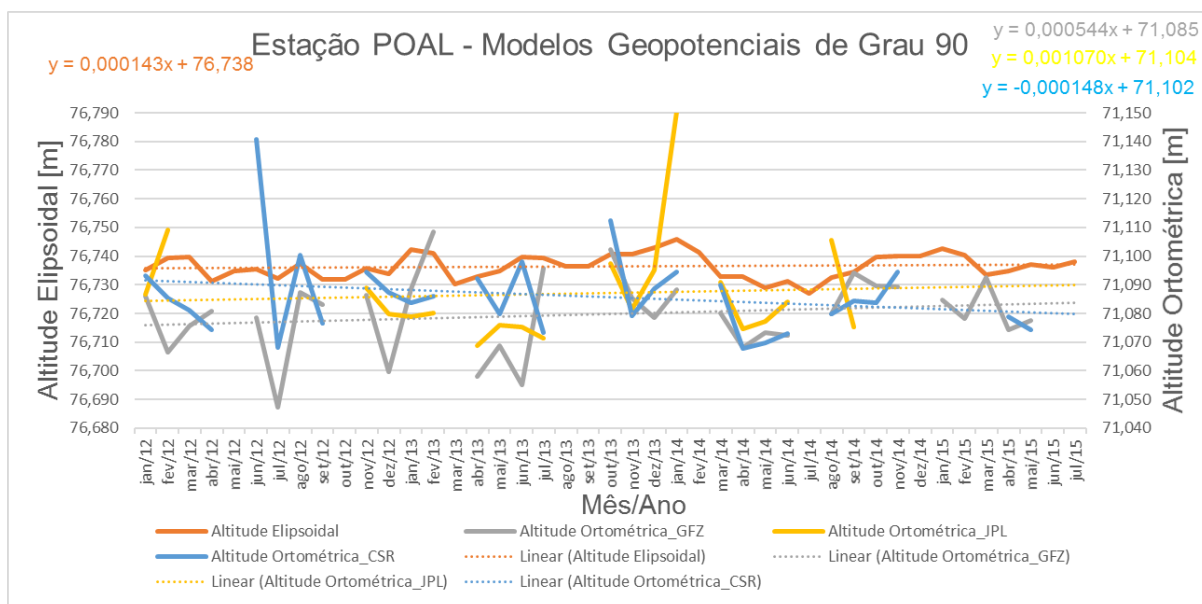
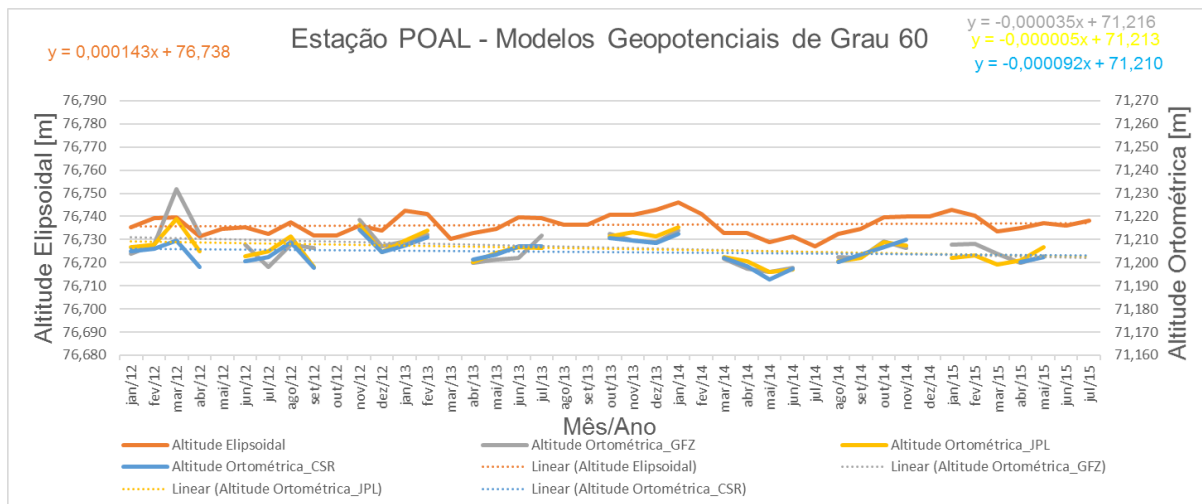
Estação NEIA



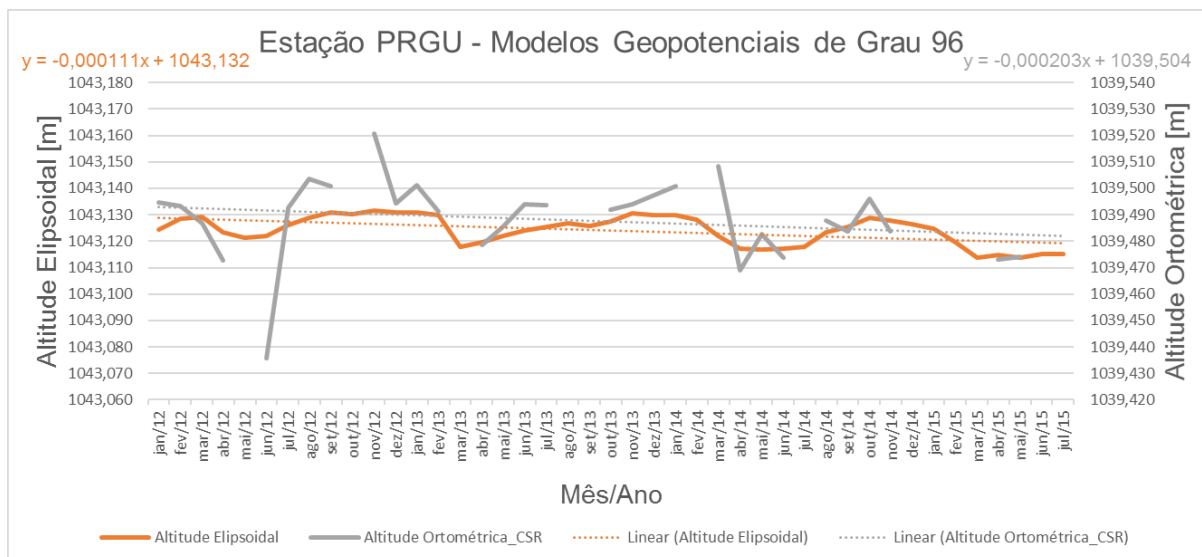
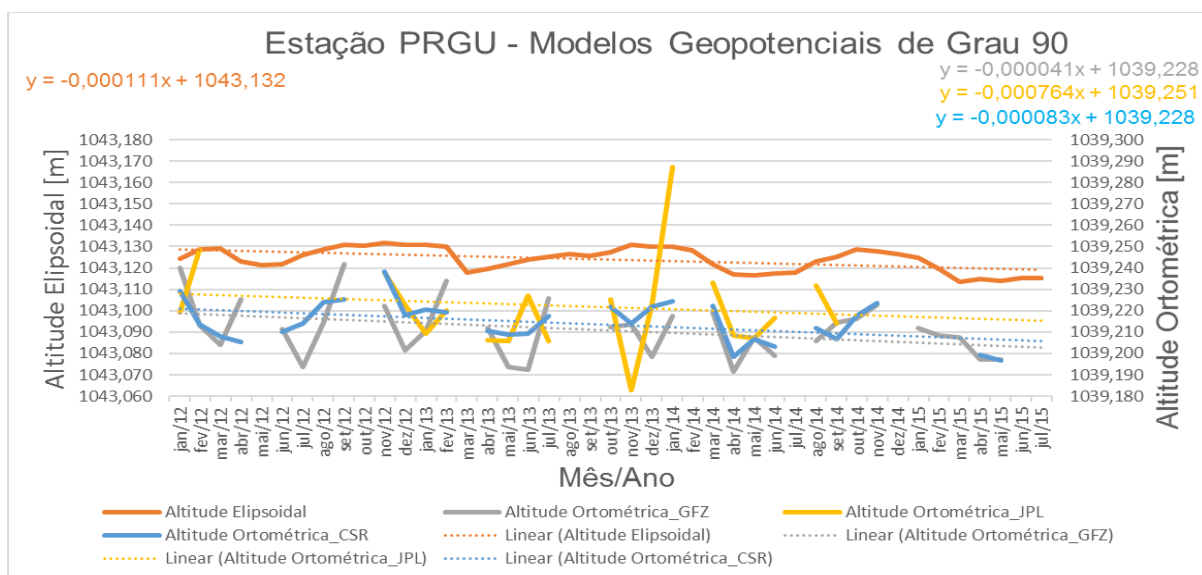
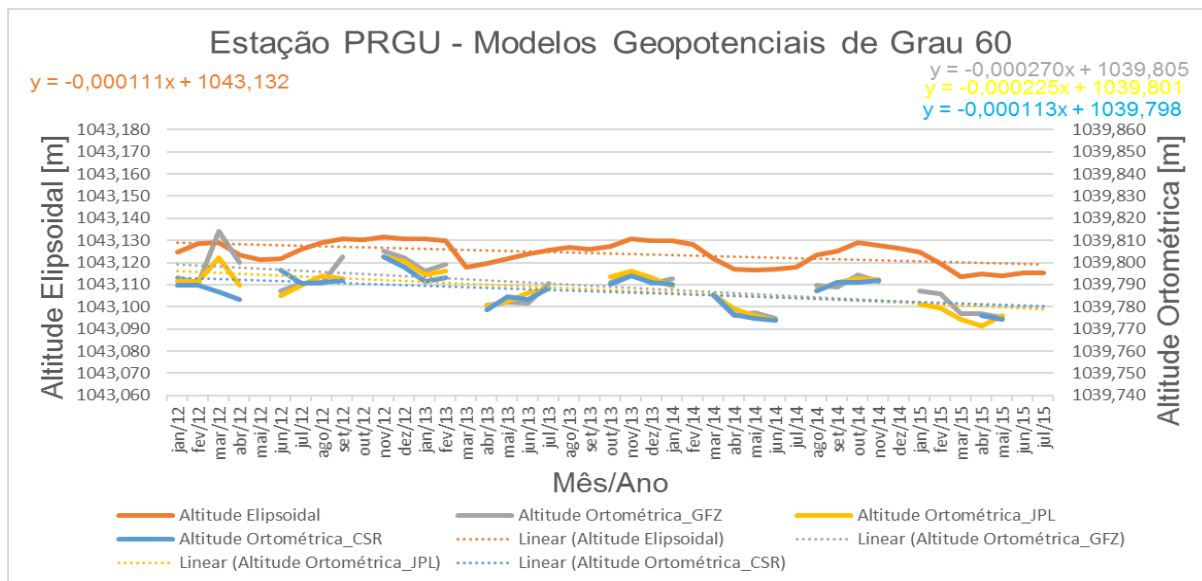
Estação ONRJ



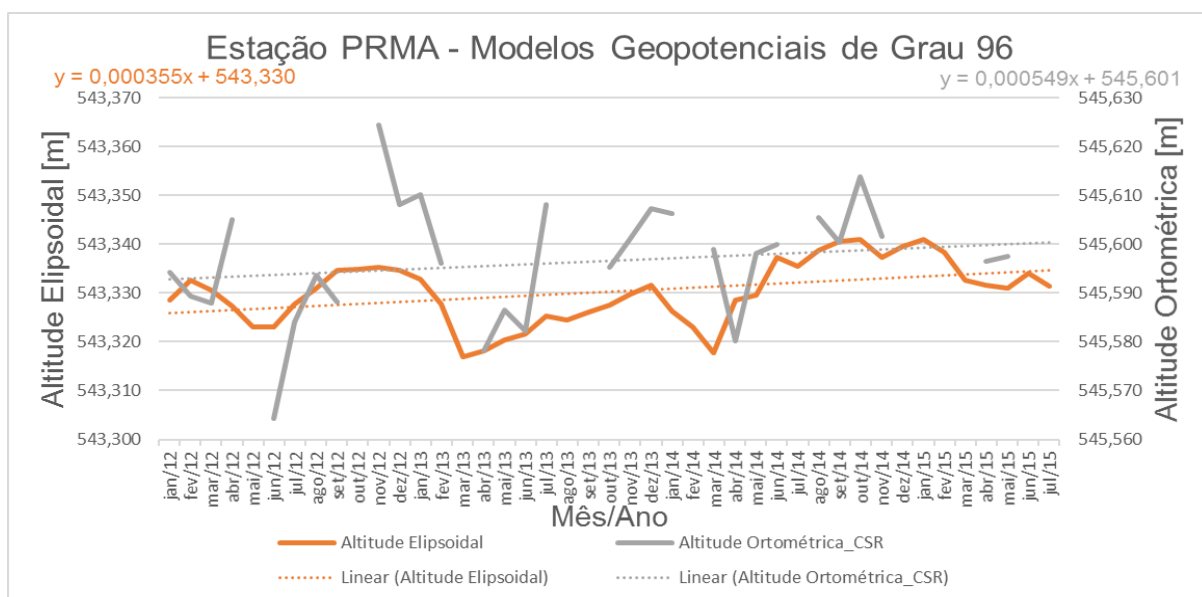
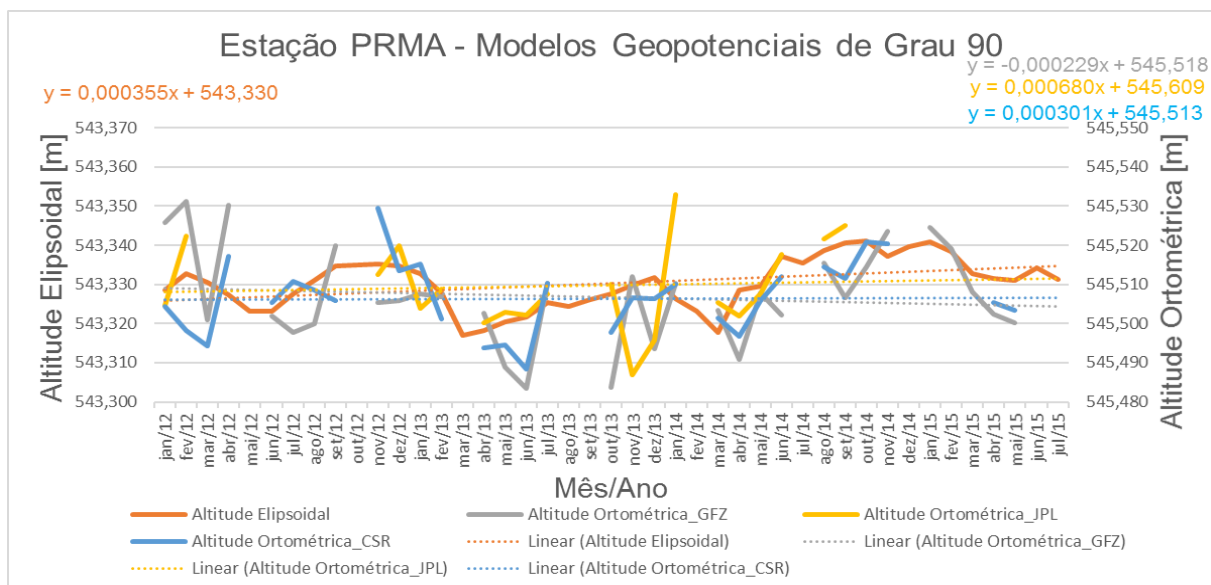
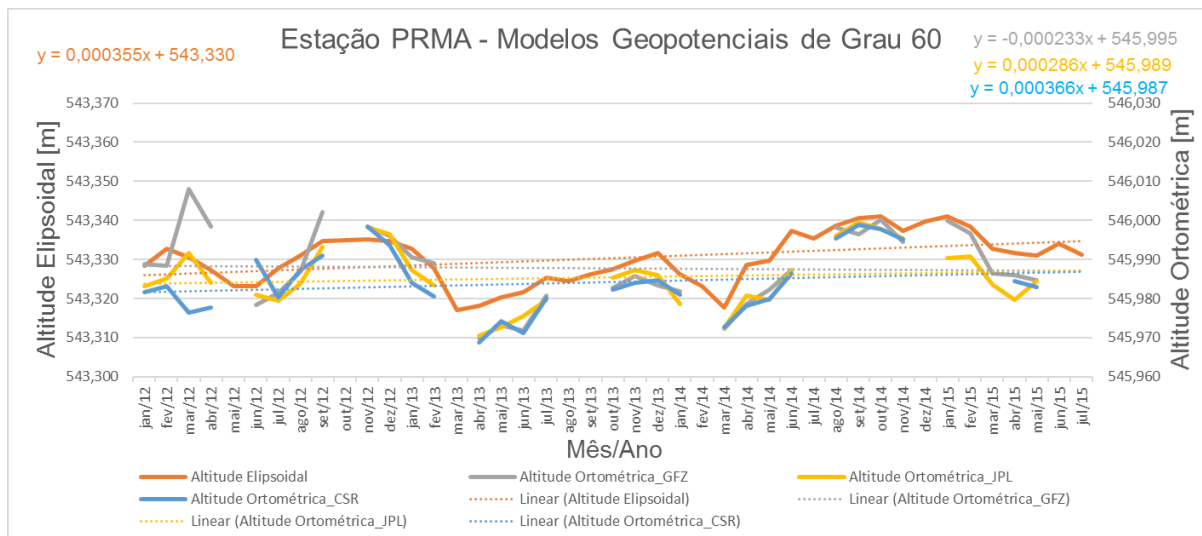
Estação POAL



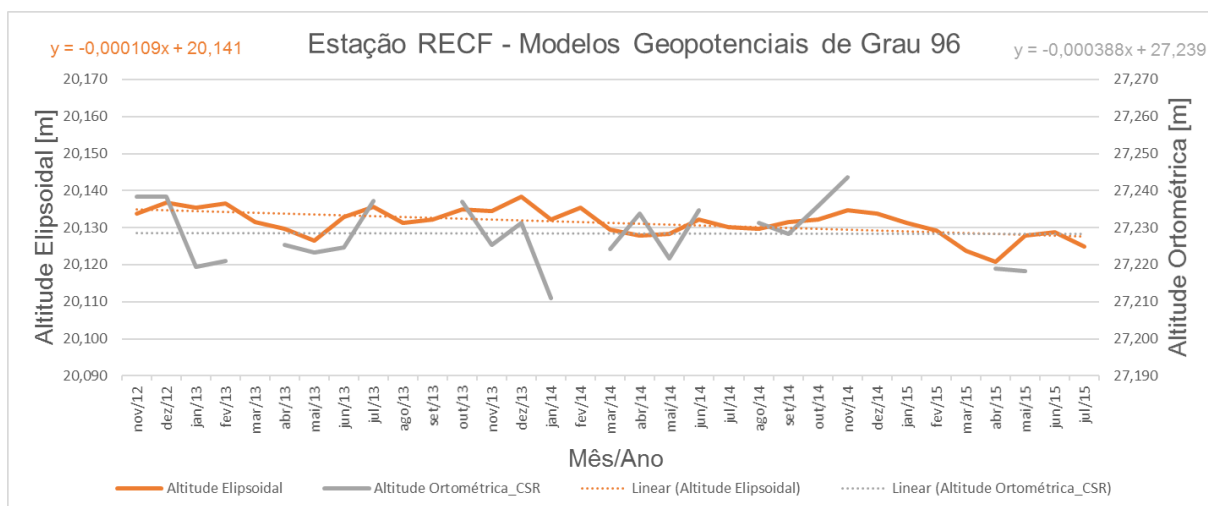
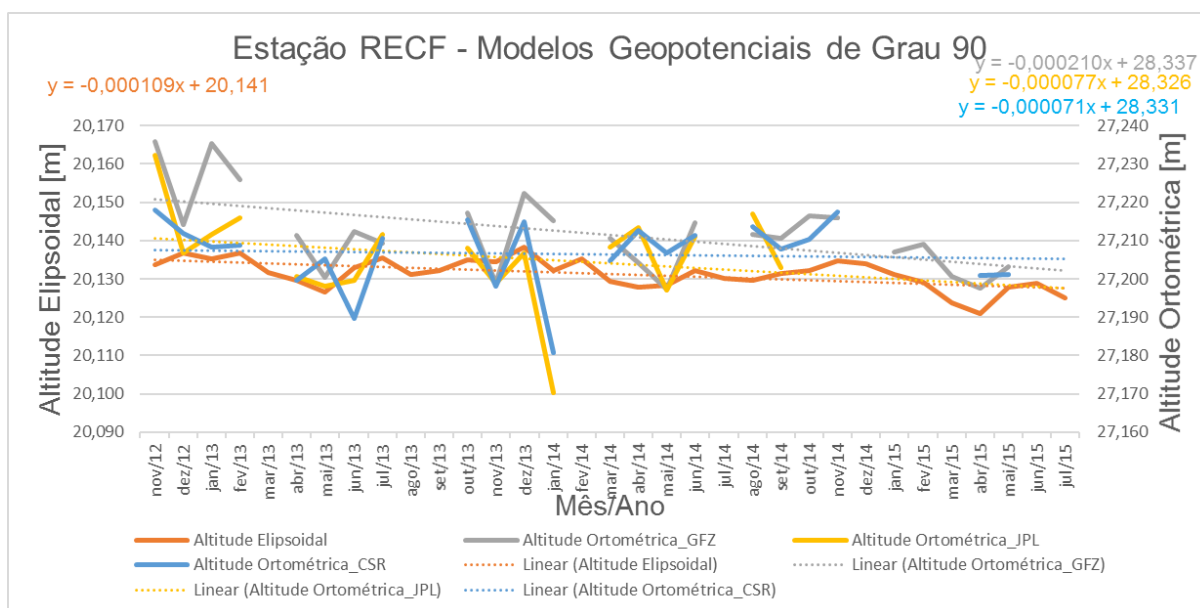
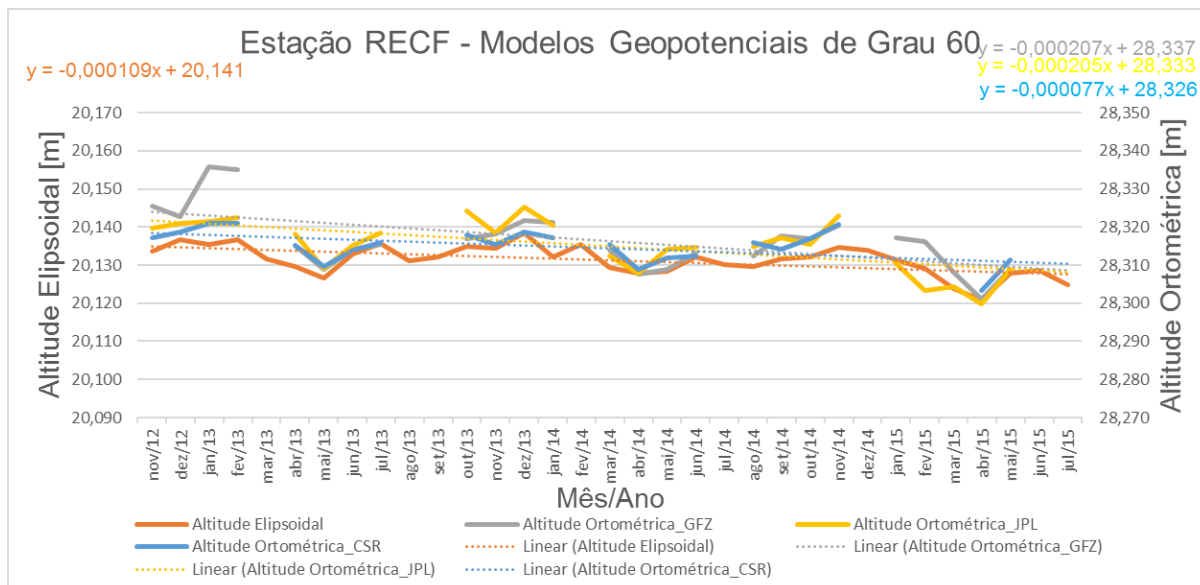
Estação PRGU



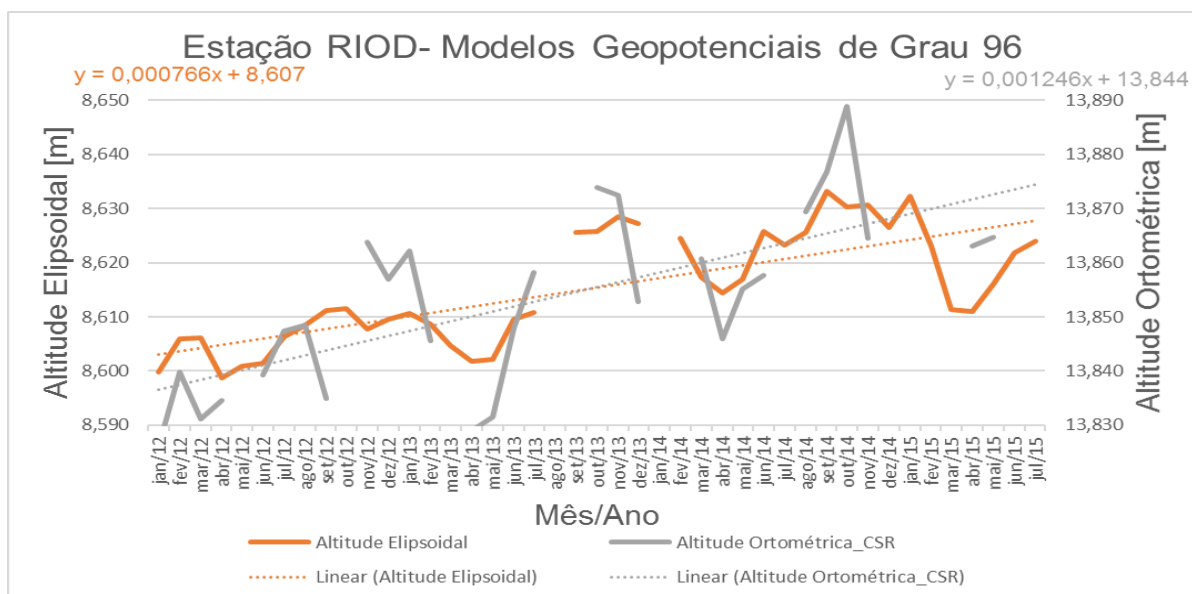
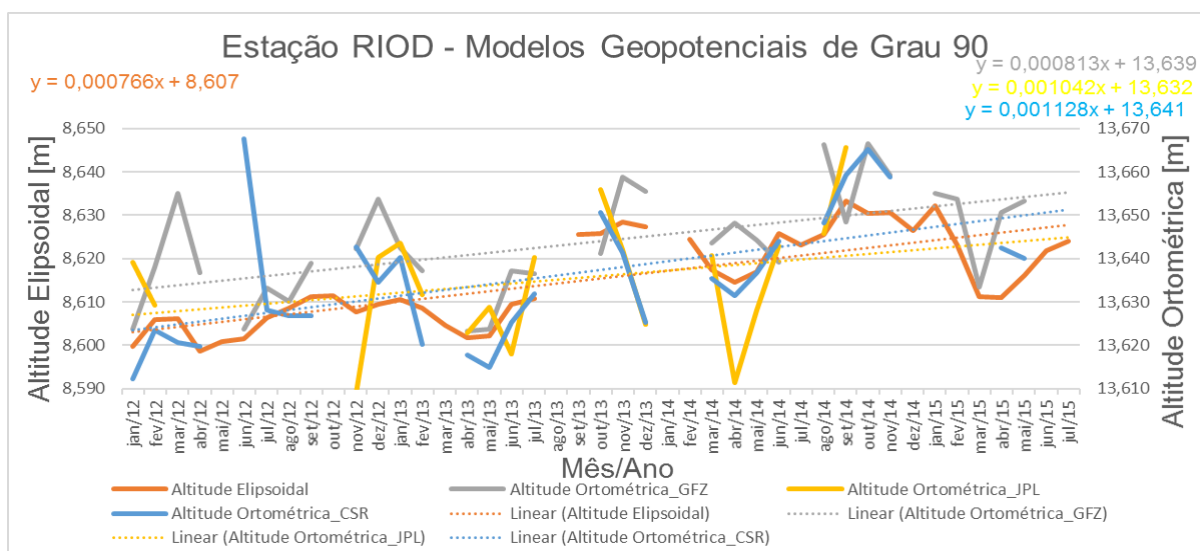
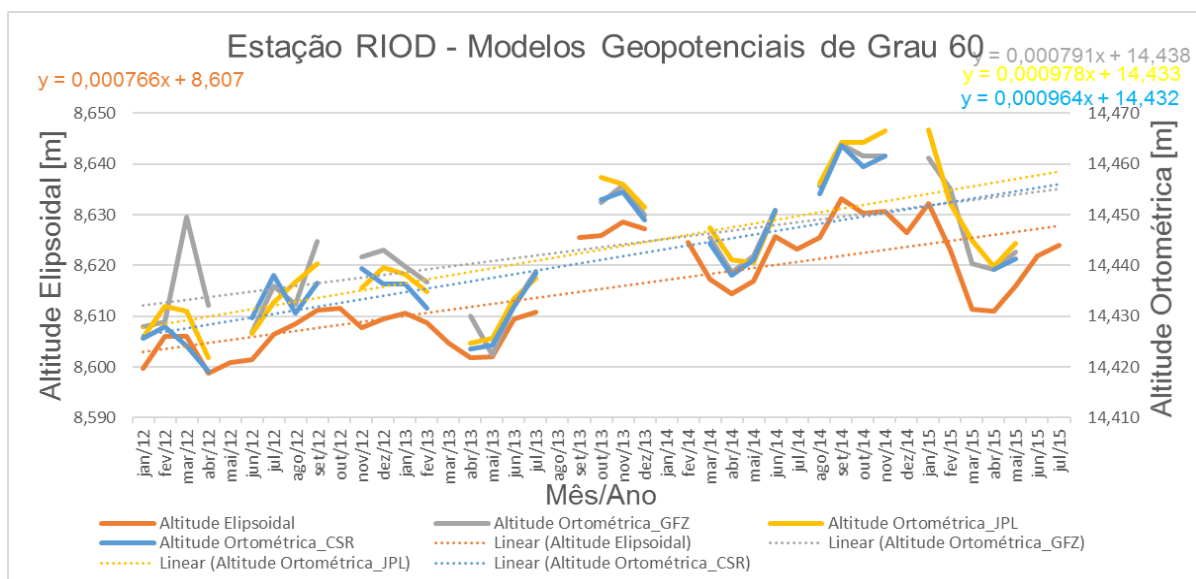
Estação PRMA



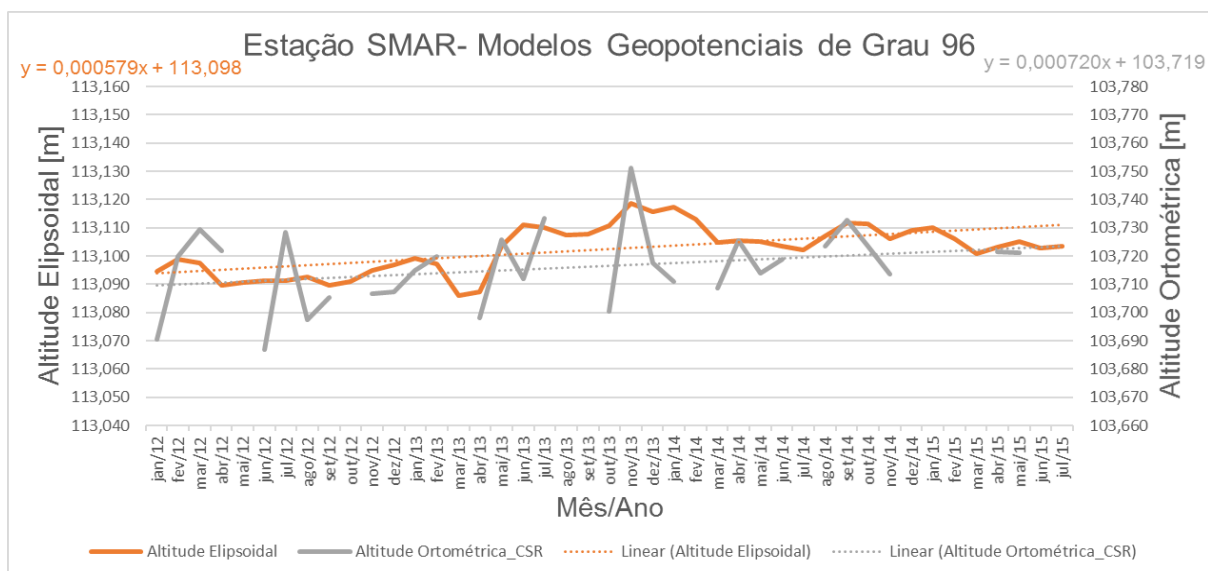
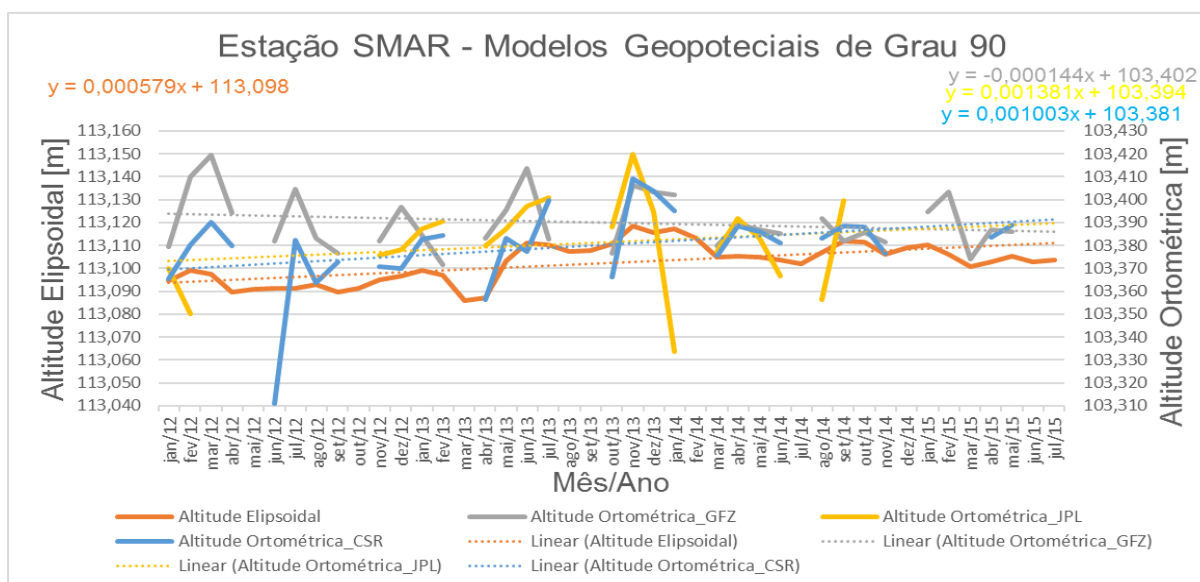
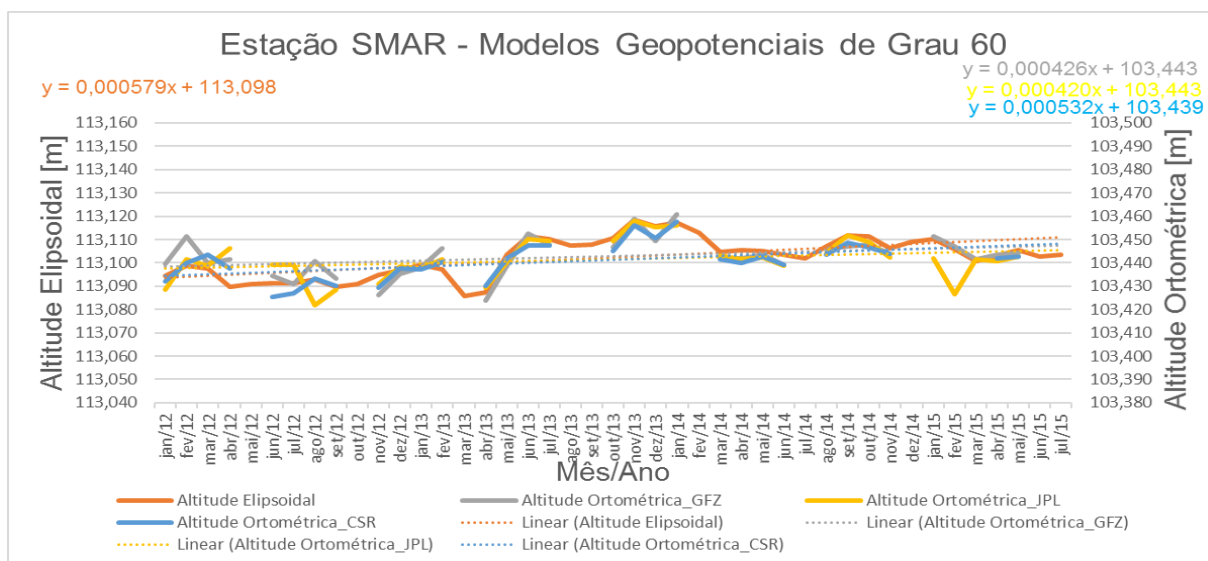
Estação RECF



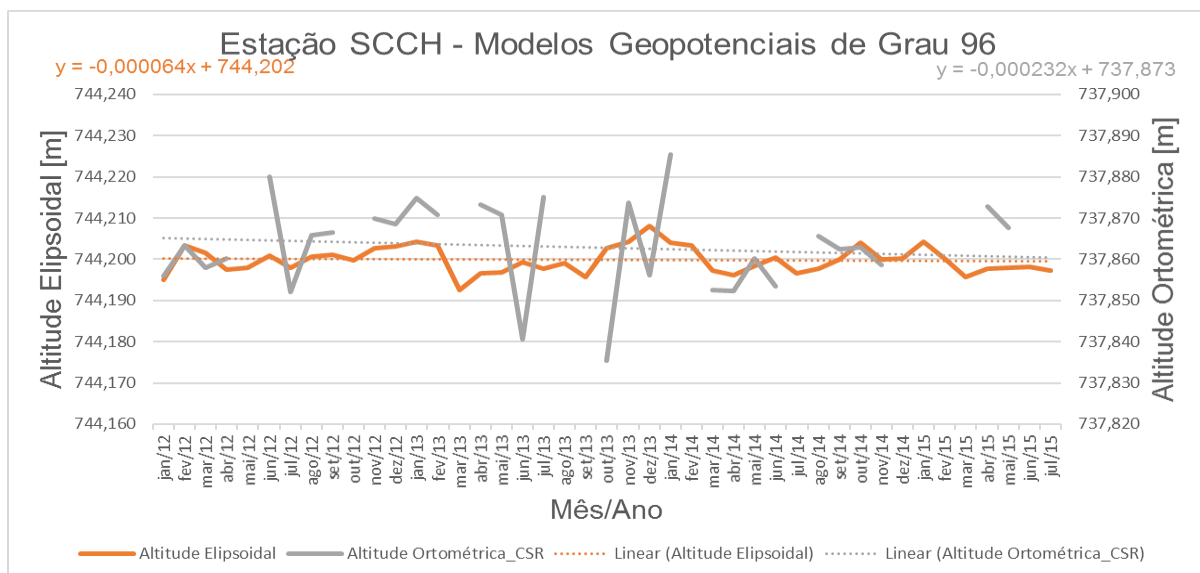
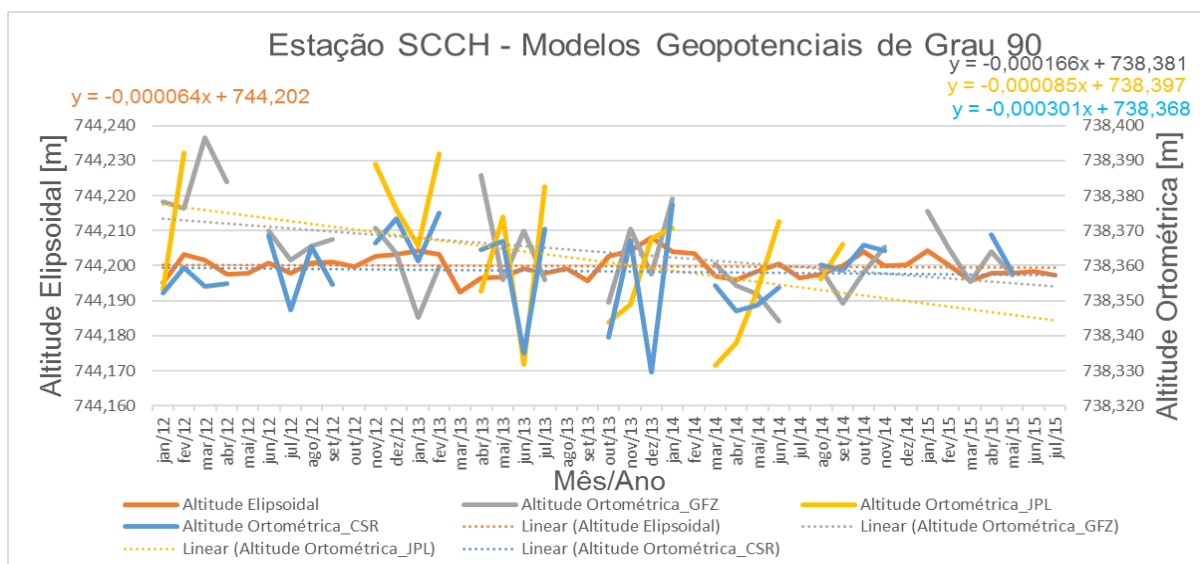
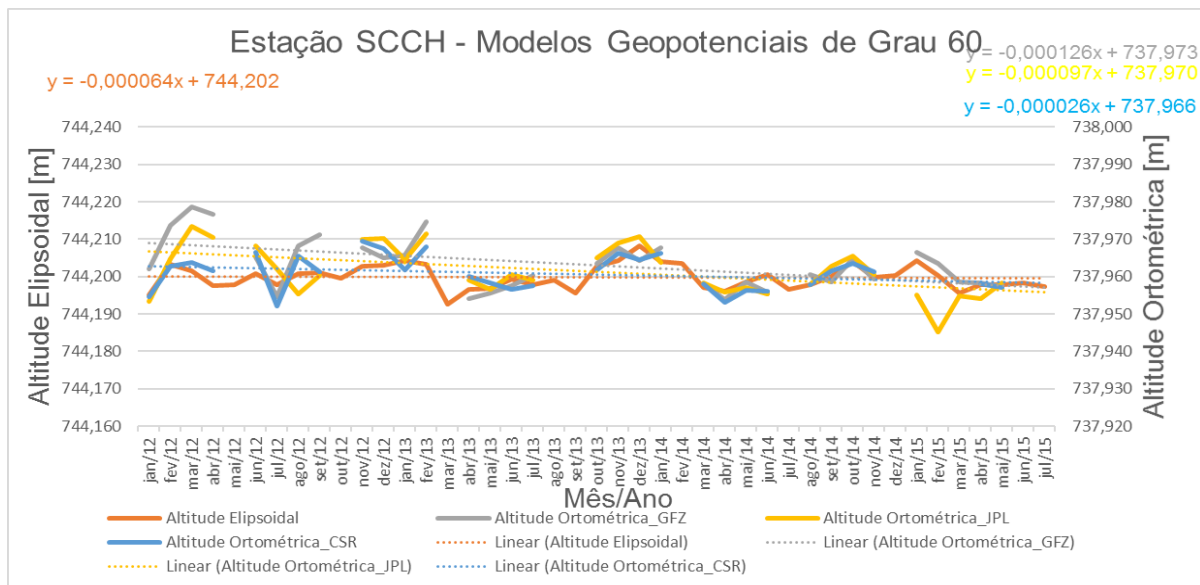
Estação RIOD



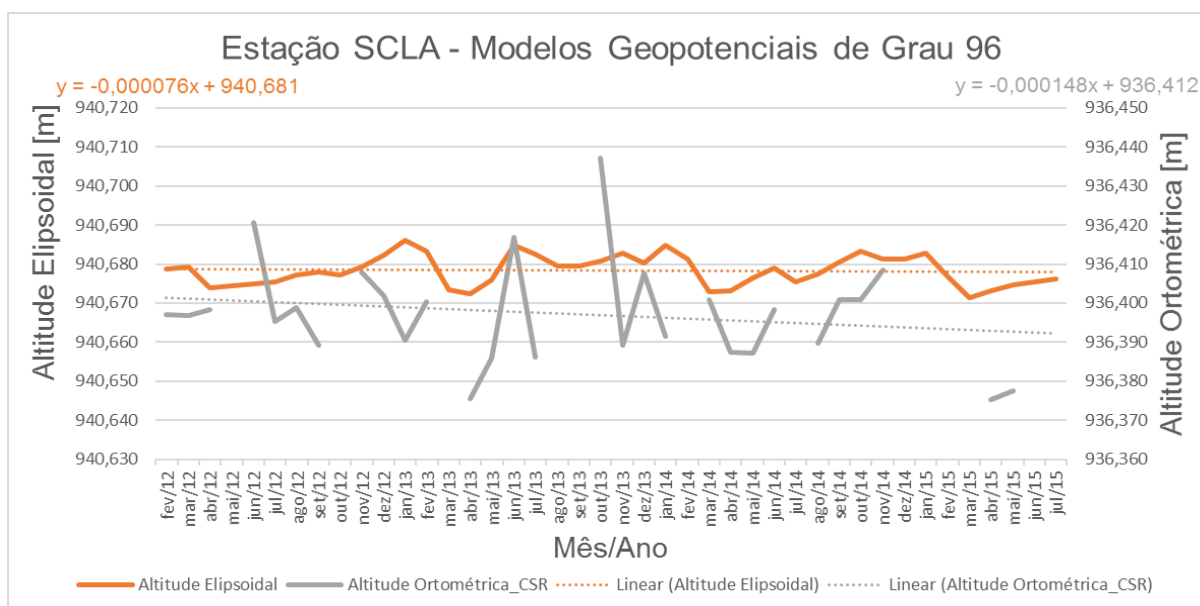
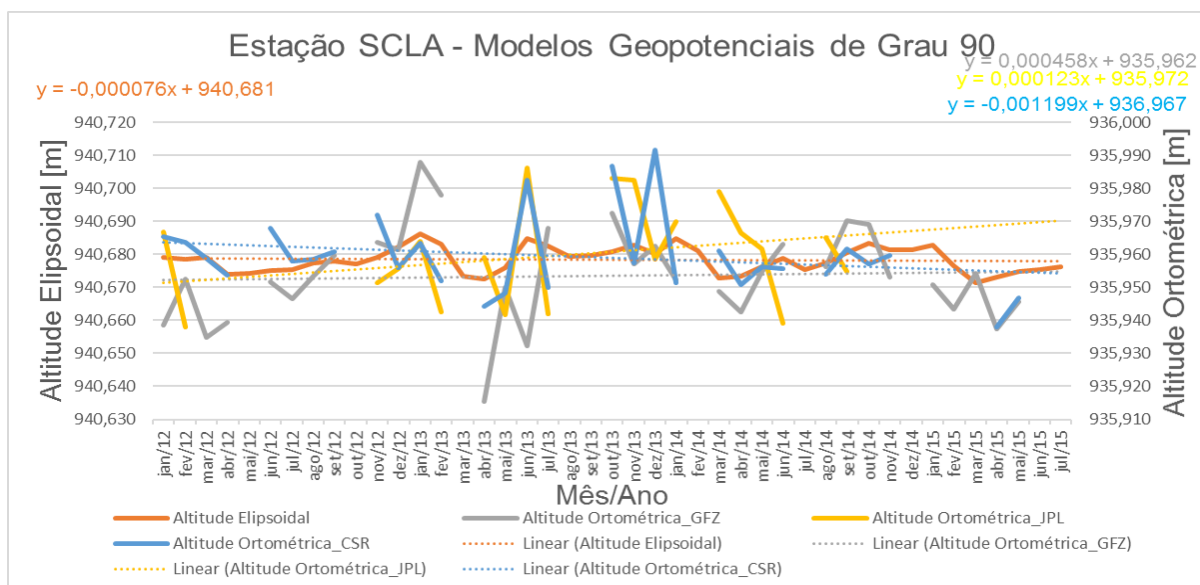
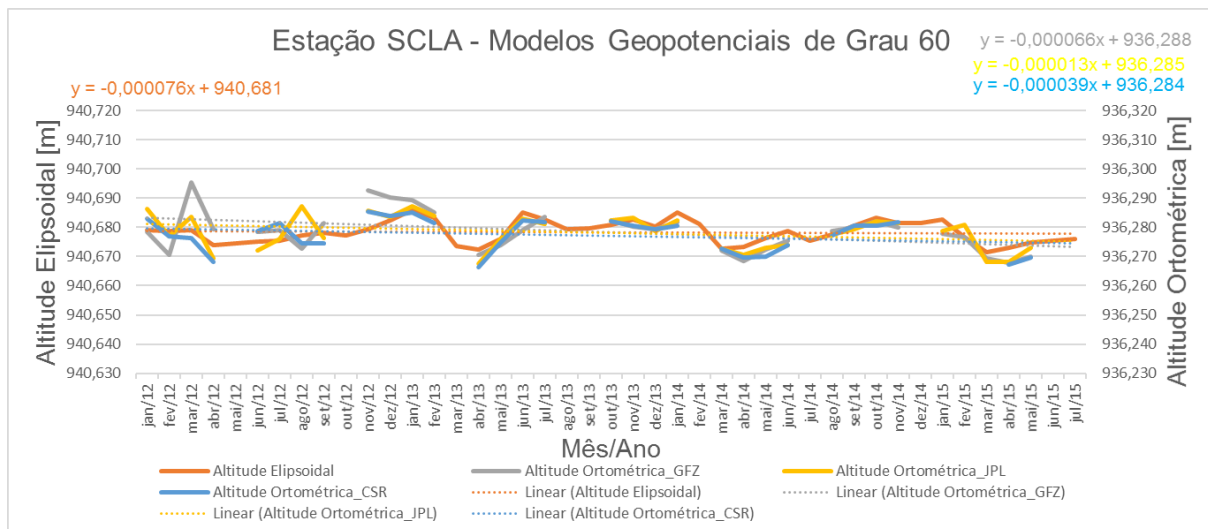
Estação SMAR



Estação SCCH



Estação SCLA



Estação UFPR

